Leonardo Scopece - Alberto Ciprian

Acustica Architettonica e Altoparlanti

Serie di articoli, pubblicati in più numeri di Elettronica e Telecomunicazioni, trattano e approfondiscono una singola tematica. Lo scopo dell'iniziativa **LeMiniSerie** è di raccogliere tali articoli, con una veste tipografica unitaria che ne faciliti la consultazione e apportando correzioni e aggiornamenti ritenuti opportuni.

Questo è il quarto di questi volumi.

Acustica Architettonica e Altoparlanti raccoglie quattro articoli pubblicati nei numeri di aprile, agosto e dicembre 2010 e aprile 2011.

LeMiniSerie sono una iniziativa del
Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della
www.crit.rai.it

In copertina:
Auditorium Rai *Arturo Toscanini* a Torino.

I primi tre capitoli sono dedicati all'Acustica Architettonica, il quarto agli Altoparlanti.

Lo studio dell'acustica architettonica è indispensabile per la realizzazione di un ambiente adatto a un particolare tipo di ascolto come, ad esempio, quello di concerti o conferenze.

Il primo capitolo vuole offrire una panoramica il più completa possibile sul tema della progettazione acustica degli ambienti chiusi, che va necessariamente distinta da quella degli spazi aperti, nei quali i fenomeni fisici sono differenti. Si tratta l'aspetto fisico dell'acustica, ripercorrendo i più importanti principi da tenere in considerazione nel momento in cui si decide di realizzare il trattamento acustico di un ambiente. L'obiettivo è quello di fornire, nel modo più chiaro e completo possibile, le basi per comprendere i fenomeni legati all'acustica fisica in modo da poter valutare al meglio che tipo di progettazione sonora si deve utilizzare per soddisfare alle proprie necessità. Molti ritengono che per ottenere un ascolto perfetto in una sala sia sufficiente investire nel sistema di altoparlanti, ma questo è un errore da evitare. E' invece soprattutto necessario conoscere i principi fondamentali dell'acustica e tenere in considerazione tutti i fenomeni che si possono generare dall'interazione di un'onda sonora con l'ambiente e tra le onde stesse.

Oltre agli aspetti fisici, è opportuno considerare sia i parametri di progetto generali, derivanti dai vari studi sviluppati nel tempo, sia la scelta dei materiali da utilizzare per ottenere un particolare effetto. Il secondo capitolo affronta temi quali: parametri che caratterizzano l'ambiente, dimensionamento e struttura dei vari componenti architettonici in gioco e, successivamente, scelta dei materiali da utilizzare in funzione delle frequenze e del tipo di riverbero che ci si aspetta ed in funzione dell'obiettivo da raggiungere.

Per poter arrivare ad ottenere un trattamento acustico completo, è necessario collocare nella sala dei componenti acustici. Spesso, tuttavia, si rischia di scegliere la tipologia errata ottenendo un effetto insufficiente o comunque diverso dalle aspettative. Il terzo capitolo si occupa dei vari tipi di componenti, analizzandone pregi e difetti a seconda del tipo di applicazione. Molte volte è necessario effettuare un'analisi teorica, in base alle conoscenze del comportamento fisico delle onde, sul posizionamento degli elementi e confrontare tale analisi con le applicazioni pratiche. Sono inoltre analizzati i sistemi surround, olofonico e ambisonico. In conclusione sono illustrati esempi di sistemi reali: l'Auditorium della Rai di Torino e la Casa del Suono dell'Università di Parma.

Gli altoparlanti sono il mezzo con cui si riesce ad irradiare in un ambiente il frutto del lavoro a cui partecipano molte professionalità: cantanti, attori, registi, tecnici, produttori e tutti coloro che, con passione e spesso con sacrificio, contribuiscono. Il risultato finale spesso dipende anche dalla scelta delle casse acustiche e dal loro posizionamento. Molte volte ci si cimenta nella sonorizzazione di una sala senza avere le basi teoriche/tecniche indispensabili per ottenere il migliore risultato. Non tutti sanno, ad esempio, che l'altoparlante, oltre ad essere l'ultimo anello della catena fonica, è anche quello più debole, quello che ha maggiore distorsione, maggiore rumore ed è il più complicato da orientare per tener conto delle differenze di fase che si possono creare tra più oggetti in un ambiente. Il quarto capitolo vuole chiarire tali temi e offrire una panoramica sulle possibili soluzioni, ponendosi l'obiettivo di fornire le nozioni base per chi si vuole cimentare nella scelta del tipo di diffusione più adatta al contesto in cui deve e vuole operare.

Leonardo Scopece

Torino, maggio 2011

I quattro capitoli corrispondono ad altrettanti articoli pubblicati su Elettronica e Telecomunicazioni in quanto parte delle attività realizzate per la tesi proposta per la laurea specialistica in ingegneria di Alberto Ciprian: "Analisi e studio della diffusione sonora multicanale in ambienti chiusi. Studio e realizzazione di una stanza per l'ascolto surround". Tesi di Laurea Politecnico di Torino, 2010, sviluppata presso Centro Ricerche della Rai. Tutor Rai: dott. Leonardo Scopece.

Cura editoriale, grafica e immagine: Marzio Barbero
Foto della copertina e a pag. 36-37: Enrico Cavallini

INDICE 3

Aspetti Fisici

Parametri di progetto e scelta dei materiali

Allestimento interno degli ambienti

Sistemi di diffusione sonora - Gli altoparlanti

Bibliografia

1 Aspetti Fisici

Testo e figure tratti dall'articolo di Leonardo Scopece e Alberto Ciprian pubblicato su Elettronica e Telecomunicazioni, Agosto 2010

1. Introduzione

Per definizione, l'acustica architettonica è quella disciplina che tratta della produzione, propagazione e ricezione del suono all'interno di ambienti chiusi. La progettazione acustica degli ambienti deve, quindi, tenere in considerazione una grande quantità di elementi come le caratteristiche fisiologiche dell'apparato uditivo umano, gli aspetti "naturali" delle onde, la modalità di propagazione nell'aria, gli aspetti "artificiali" come le varie tipologie di arredamento e strumentazione interna.

In questo primo capitolo si analizzano i vari aspetti atti a valutare quale può essere la progettazione di un ambiente per l'ascolto, partendo da considerazioni quali i parametri fisici e le tecniche per stimare i comportamenti delle onde sonore, fino all'analisi delle tipologie di materiale e delle diverse tipologie di componenti che contribuiscono alla correzione acustica della sala.

2. Parametri fisici

2.1 Propagazione dell'onda sonora

Ogni suono ha origine dalla vibrazione di un corpo elastico. Questa ha un andamento ondulatorio, descrivendo quindi nel tempo una traiettoria che si può rappresentare graficamente, nel modo più semplice, come una sinusoide. Esistono diverse componenti che caratterizzano un'onda, tra cui la più importante è la frequenza. Questo parametro fisico permette di definire un parametro sensoriale: l'***altezza del suono***, ossia se aumenta la frequenza un suono tende a diventare più acuto, mentre se diminuisce diventa più grave.

Un secondo parametro fisico è l'ampiezza dell'oscillazione, che permette di determinare un altro parametro sensoriale: l'***intensità del suono***.

Per capire come avviene la propagazione è necessario prima capire come è fatta a livello strutturale l'aria. É formata da una grande quantità di molecole ''unite" tra loro da legami elastici; ad esempio, si può affermare che quando un corpo vibra comunica il suo movimento alla prima molecola d'aria "confinante", la quale, spostandosi, spinge la molecola successiva, e così via. Un attimo dopo, i legami elastici (che possono essere immaginati come molle), richiamano indietro la molecola nella sua posizione iniziale di equilibrio. Per effetto di questi movimenti ci saranno delle zone di compressione e rarefazione dell'aria. Queste si ripetono dalla sorgente nel verso di propagazione dell'onda sonora. Considerando una generica sorgente sonora, il suono tende a propagarsi allo stesso modo in tutte le direzioni (cioè secondo fronti d'onda sferici, figura 1). La superficie del fronte d'onda aumenta in modo proporzionale con il quadrato della distanza dalla sorgente.

Di conseguenza, l'energia che possiede il fronte d'onda si distribuisce su tutta la superficie, per cui su una singola unità di superficie si ha che l'energia decresce con il quadrato della distanza.

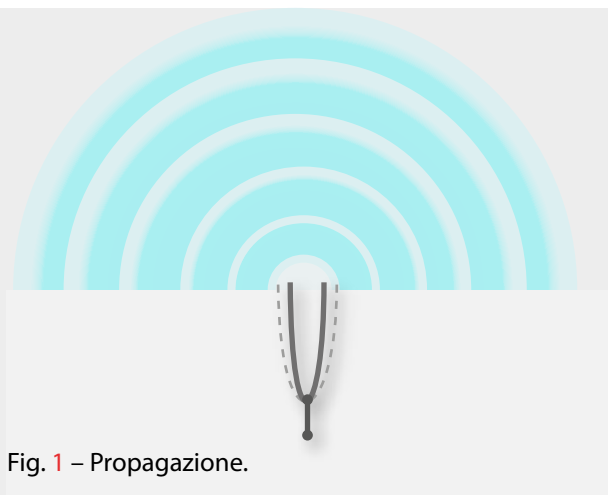



Fig. 1 – Propagazione.

Siccome l'energia è proporzionale all'intensità sonora, si può affermare che l'intensità sonora decresce con il quadrato della distanza, quindi:

- raddoppiando la distanza, l'intensità sonora decresce di 6 dB
- decuplicando la distanza, l'intensità sonora decresce di 20 dB

É, inoltre, da sottolineare il fatto che il suono si propaga a una velocità che dipende principalmente dalla natura del mezzo elastico in cui si diffonde, ma anche dalla temperatura, dalla pressione e dall'umidità. Di seguito vengono riportati alcuni valori della velocità di propagazione in diversi materiali a 20°C e al livello del mare:

Materiale	*Velocità [m/s]*
Aria	343
Acqua	1480
Ghiaccio	3200
Vetro	5300
Piombo	1200

Un'altra grandezza fondamentale legata alla propagazione del suono è la lunghezza d'onda λ, cioè la distanza fra due punti consecutivi dell'onda che vibrano in concordanza di ampiezza e fase. La lunghezza d'onda si misura in metri ed è in funzione della frequenza e della velocità di propagazione secondo la seguente relazione:

$$\lambda = v / f$$

dove v è la velocità di propagazione e f è la frequenza.

Questa grandezza ha un ruolo importante soprattutto quando ha una misura paragonabile a quella delle dimensioni dell'ambiente di diffusione, in quanto determina il fenomeno delle onde stazionarie. La tabella seguente mostra alcuni valori di lunghezze d'onda in funzione della frequenza in aria libera:

Frequenza [Hz]	*Lunghezza d'onda [m]*
20	17
50	6.8
100	3.4
250	1.36
2000	0.17
5000	0.068
10000	0.034
20000	0.034

2.2 Le onde stazionarie

Le onde stazionarie sono particolari tipi di perturbazioni periodiche, le cui oscillazioni sono limitate nello spazio. L'ampiezza dell'oscillazione è nulla in alcuni punti, detti nodi, mentre è massima in altri, detti ventri; ogni ventre si trova a metà tra due nodi.

Immaginando una coppia di onde che si propaga in uno spazio delimitato da due superfici parallele riflettenti, si nota come l'onda stazionaria viene generata dalla somma delle due onde. A questo punto risulta necessario modificare l'equazione dell'onda, aggiungendo le condizioni al contorno che limitano il moto. Detto L lo spazio di propagazione, l'equazione dell'onda diventa:

$$\frac{\partial^2 \zeta(x,t)}{\partial^2 x} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \zeta(x,t)}{\zeta\ t^2}$$

alla quale vanno aggiunte le seguenti condizioni: $\zeta(0, t) = A$ e $\zeta(L, t) = B$. Si ottiene quindi la soluzione generale della formula:

$$\zeta(x, t) = A \cos(kx) + B \sin(kx)$$

Le onde stazionarie si possono quindi considerare come il risultato dell'interferenza di onde progressive e regressive sinusoidali aventi la stessa frequenza.

2.3 Riflessione

La riflessione è uno dei fenomeni più comuni che si manifesta nel momento in cui un'onda sonora entra in contatto con una superficie. Quello che però può apparire meno ovvio è il fatto che la riflessione si genera soltanto nel caso in cui la dimensione della superficie riflettente dell'onda sonora sia sufficientemente grande rispetto alla lunghezza d'onda **λ**. Quindi, in base alla dimensione dell'ostacolo che incontra l'onda si possono avere diversi effetti:

- se la dimensione dell'ostacolo è minore di 1/3 di **λ** non c'è riflessione
- se la dimensione è comparabile con **λ** si ha una riflessione solo della metà dell'energia e si passa al fenomeno della diffrazione
- se la dimensione è maggiore del triplo di **λ** allora si ha riflessione totale

2.4 Diffrazione

É un fenomeno complementare alla riflessione che si definisce come la deviazione della traiettoria delle onde, quando queste incontrano un ostacolo fisico. In particolare, quando la lunghezza d'onda è grande e non ci sono riflessioni, o comunque sono molto poche, si può assumere che l'onda aggiri l'ostacolo. Similmente, quando la lunghezza d'onda è piccola, c'è una buona riflessione, tuttavia parte dell'energia è in grado di aggirare l'ostacolo. In questo caso si parla di ombra acustica (figura 2); se, invece, le dimensioni dell'ostacolo sono maggiori della lunghezza d'onda dell'onda incidente, si manifestano solo parziali fenomeni di ombra acustica.

Quando su una superficie è presente un'apertura di dimensioni maggiori di **λ**, l'onda passa attraverso generando un fascio stretto, mentre se **λ** è grande si produce un fascio diffuso (figura 3).

2.4.1 Principio di Huygen

Il principio di Huygen è un metodo di analisi applicato spesso per lo studio della propagazione delle onde luminose. Secondo Huygen: *"...ciascuna particella della materia in cui un'onda viaggia comunica il suo moto non solo alla particella vicina che è allineata con la sorgente luminosa, ma necessariamente anche alle altre con le quali è a contatto e che si oppongono al suo movimento. Cosicché intorno a ciascuna particella si origina un'onda di cui essa è il centro"*. In sintesi il principio afferma che tutti i punti di un fronte ***F(t)*** possono essere considerati sorgenti puntiformi di onde sferiche secondarie aventi la stessa frequenza dell'onda principale.

Dopo un tempo ***Δt*** la nuova posizione del fronte ***F(t + Δt)*** sarà la superficie di inviluppo di queste onde secondarie. Il campo complessivo è dato dalla sovrapposizione dell'onda primaria con quelle di ordine superiore.

Pur essendo nato per studiare i fenomeni luminosi, questo principio, può essere esteso per la previsione di tutti i fenomeni ondulatori.

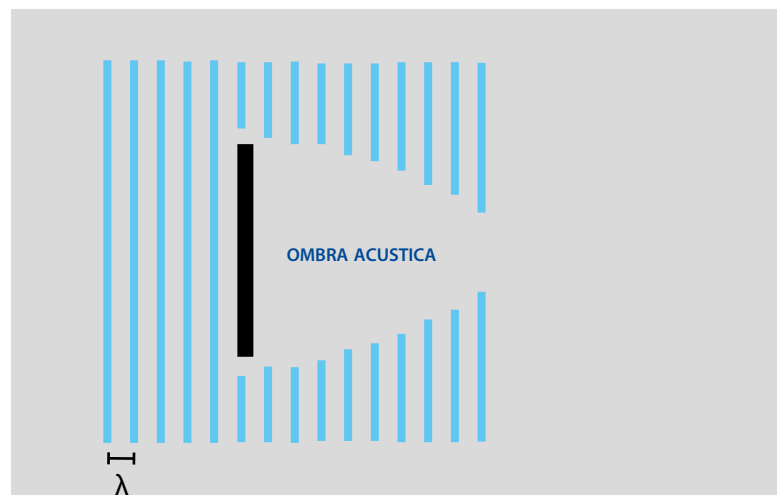



Fig. 2 - Ombra acustica.

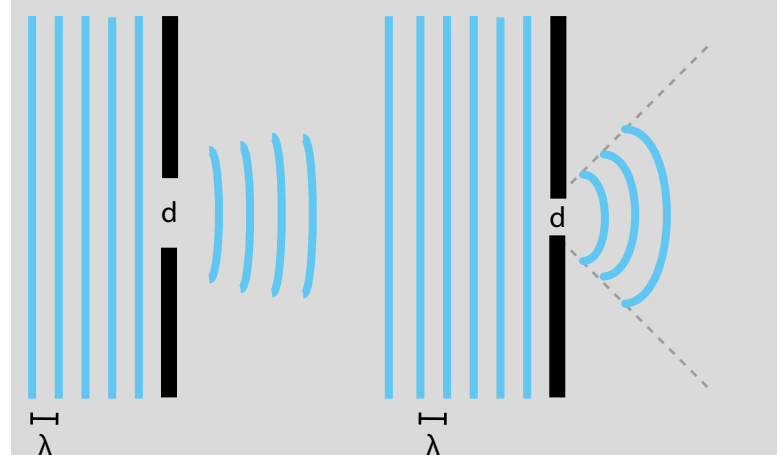



Fig. 3 - Diffrazione: a) λ < d, b) λ > d.

2.5 Rifrazione

La rifrazione è un fenomeno per il quale la curvatura del percorso delle onde sonore cambia quando passano da un mezzo elastico a un altro, in cui la velocità di propagazione è diversa. Un esempio si può avere quando con una temperatura calda e un clima umido i suoni distanti vengono percepiti con estrema chiarezza. Questo è giustificabile con una "inversione" di temperatura, ovvero il terreno si raffredda velocemente e gli strati d'aria diventano più caldi rispetto a quelli in prossimità del suolo. In altre parole, se la temperatura dell'aria è maggiore di quella della superficie, le onde si direzionano all'ingiù verso la superficie per effetto della rifrazione.

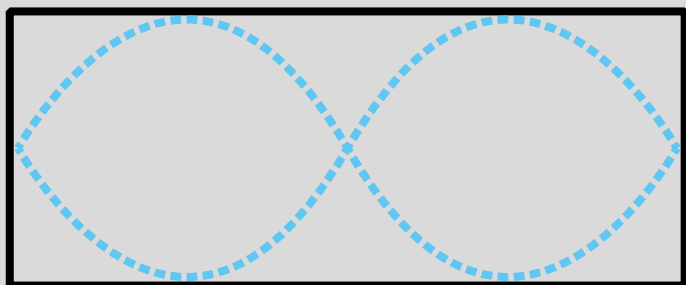



Fig. 4 - Tubo con pareti chiuse.

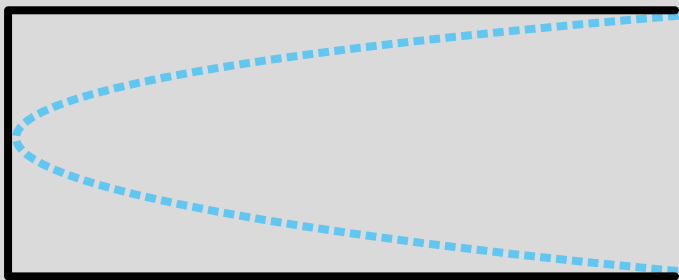



Fig. 5 - Tubo con lato aperto.

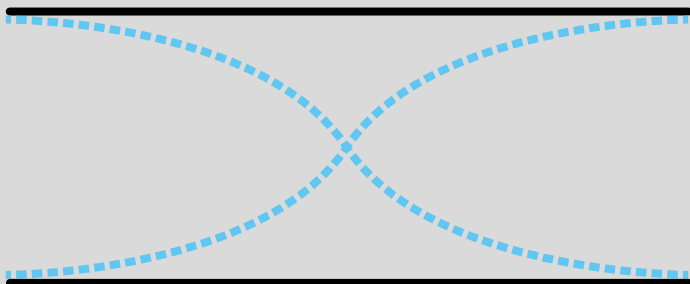



Fig. 6 - tubo con pareti aperte.

Questo fenomeno viene descritto tramite la legge di Snell, secondo cui il rapporto tra il seno dell'angolo generato da un raggio incidente su una superficie e quello generato dal raggio rifratto è uguale al rapporto inverso degli indici di rifrazione dei mezzi attraversati dai raggi:

$$\frac{\sin\alpha_{inc}}{\sin\alpha_{rifr}} = \frac{n_2}{n_1}$$

L'indice di rifrazione è definito come:

$$n = \frac{c}{v}$$

dove ***c*** è la velocità della luce e ***v*** è la velocità dell'onda attraverso un certo mezzo di propagazione. Perciò la relazione precedente può essere riscritta come:

$$\frac{\sin\alpha_{inc}}{\sin\alpha_{rifr}} = \frac{v_1}{v_2}$$

In realtà, nel caso di un'onda sonora, la rifrazione è rappresentata sempre dal rapporto dei seni uguale, però, al rapporto tra la velocità nel mezzo rifrangente e la velocità nel primo mezzo:

$$\frac{\sin\alpha_{inc}}{\sin\alpha_{rifr}} = \frac{v_2}{v_1}$$

Quindi, l'onda sonora non si avvicina alla normale al piano di incidenza nel mezzo, con indice di rifrazione n_2, ma si allontana per ritrovarsi parallela a prima del momento di incidenza quando si ripassa al mezzo con indice di rifrazione $n_1 > n_2$.

2.6 Risonanza in tubi e corde

La risonanza è un fenomeno fisico per il quale un corpo elastico inizia a vibrare a una certa frequenza propria dopo essere stato eccitato con una certa energia. Per analizzare meglio il fenomeno è utile valutare il comportamento di un'onda all'interno di un tubo, in tre condizioni differenti, e di una corda.

2.6.1 Tubi

- ***pareti chiuse***: questo caso è equivalente allo studio del comportamento delle onde stazionarie (figura 4).

A seguito di un'opportuna eccitazione, il tubo risuona alla frequenza propria per una lunghezza di ***λ/2*** e per frequenze superiori. L'ampiezza ***p*** che si crea dalla sovrapposizione delle onde è data dalla relazione:

$$p = p_{max}\left(\cos 2\pi \frac{x}{\lambda}\right)(\cos 2\pi f t)$$

Da notare è la presenza di tre zone nodali[Nota 1] in prossimità delle pareti e al centro.

- ***una parete chiusa***: in questo caso è possibile verificare un fenomeno meno ovvio di quanto si possa pensare, ovvero: dalla parte aperta del tubo è possibile notare una riflessione parziale dell'onda sonora. Questo fatto è spiegabile poiché la velocità del suono in un grande volume d'aria è leggermente differente rispetto al caso in cui l'area è limitata a causa dell'effetto di attrito delle pareti, così le onde all'interno del tubo trovano condizioni di trasmissione differenti sull'apertura a causa della variazione d'impedenza nel mezzo. La riflessione non è mai completa, ma viene riflessa soltanto una parte dell'energia, a seconda delle dimensioni del tubo. Tuttavia, in alcuni casi può essere sufficiente per dare origine al fenomeno delle onde stazionarie. In figura 5 è possibile vedere la rappresentazione del tubo aperto da un lato. Nel modo di vibrazione più semplice la lunghezza del tubo si approssima a ***λ/4***. Si "approssima" in quanto la lunghezza acustica del tubo non corrisponde esattamente alla lunghezza fisica.

  La lunghezza acustica è data dalla somma ***l+a*** , dove "***l***" è la lunghezza fisica del tubo, mentre "***a***" corrisponde a un parametro di correzione[Nota 2]. Da questo si deduce come la minima frequenza di risonanza sia:

$$f_{ris} = \frac{nv}{4(l+a)}$$

dove ***n*** corrisponde al numero dell'armonica (***n***=1,2,3,...) diverso da 0.

Nota 1 - punti in cui l'onda diretta e quella riflessa si intersecano e l'ampiezza è pari a 0.
Nota 2 - normalmente equivale a 0,6 • r, dove r è il raggio.
Nota 3 - punti in cui l'ampiezza generata tra la prima e la seconda onda è massima.

Per quanto riguarda la pressione, è da notare che è nulla in prossimità del lato aperto del tubo, mentre è massima in prossimità del lato chiuso.

- ***pareti aperte***: in questo caso (figura 6), il valore ***l*** corrisponde a metà della lunghezza d'onda (***λ/2***). Siccome le pareti laterali sono aperte entrambe, è necessario apportare una doppia correzione, quindi la lunghezza acustica vale ***l+2a***.

  É da notare, inoltre, che in questo caso, a differenza del primo con le pareti chiuse, in prossimità delle pareti ci siano due ventri[Nota 3].

  La frequenza di risonanza viene quindi descritta dalla seguente relazione:

$$f_{ris} = \frac{nv}{2(l+2a)}$$

Bisogna infine notare che in tutti e tre i casi, l'onda sonora trova nel tubo, chiuso e aperto, un amplificatore naturale. Il tubo può amplificare fino a 10÷12 dB il segnale eccitatore.

2.6.2 Vibrazioni nelle corde

Per valutare le vibrazioni prodotte nelle corde si assume che la loro lunghezza sia maggiore del loro spessore e che siano flessibili. La velocità di un'onda trasversale corrisponde a:

$$v = \left(\frac{T}{m}\right)^{\frac{1}{2}}$$

dove ***T*** è la tensione della corda, mentre ***m*** è la massa per unità di lunghezza. Analogamente a quanto descritto per i tubi, si considera il modo semplice di vibrazione come quello del caso in cui alle estremità ci siano due ventri (ad esempio nel tubo aperto ad entrambe le estremità), cioè ***λ = 2l***. Di conseguenza, la minima frequenza di vibrazione è:

$$\frac{1}{2l}\left(\frac{T}{m}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Le armoniche prodotte in una corda vibrante dipendono dalla natura e dalla modalità dell'eccitazione. Le onde longitudinali, invece, hanno una velocità che corrisponde a:

$$v = \left(\frac{y}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$$

dove $\boldsymbol{y}$ è il modulo di Young[Nota 4], mentre $\boldsymbol{\rho}$ è la densità. Considerando ad esempio l'acciaio ($y = 2 \cdot 1011$ N/m^2 e $\rho = 8 \cdot 103$ kg), si ha che $v = 500$ m/s.

L'espressione per la minima frequenza per le onde longitudinali è:

$$\frac{1}{2l}\left(\frac{y}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Sostituendo dei valori rilevanti, si è evidenziato come la frequenza per le vibrazioni longitudinali sia maggiore rispetto a quella per le vibrazioni trasversali.

2.7 Riverbero

Ogni volta che un'onda sonora colpisce una superficie all'interno di un ambiente ha origine, come detto, una riflessione, che a sua volta darà origine ad altre, e così via. Siccome la velocità di propagazione del suono è elevata (≈340 m/s), in pochi centesimi di secondo dall'uscita del suono dalla sorgente la stanza è immersa in riflessioni che si aggiungono e modificano il suono diretto. La somma delle riflessioni viene detto riverbero, e, quindi, il campo sonoro costituito dall'insieme delle onde (ognuna caratterizzata da un certo ritardo temporale e da un certo livello di attenuazione) viene detto campo di riverberazione.

Nota 4 - è dato dal rapporto tra la forza applicata σ e l'allungamento relativo ε.

2.7.1 Tempo di riverberazione

Uno dei parametri più importanti per valutare la qualità acustica di un ambiente è il *tempo di riverberazione* o *tempo di Sabine*, indicato comunemente con la sigla T_{60}, che indica il tempo necessario affinché la densità media dell'energia sonora diminuisca di 60 dB. Generalmente per ambienti poco riverberanti il valore del T_{60} è minore di un secondo, mentre per ambienti molto riverberanti è maggiore di due secondi.

Il calcolo del T_{60} può essere effettuato tramite due equazioni:

- ***equazione di Sabine:*** fornisce risultati accurati nel caso in cui il valore medio dei coefficienti di assorbimento dei materiali considerati sia inferiore a 0.2. Trascurando gli effetti di assorbimento dell'aria sopra i 4 kHz si ottiene la seguente relazione:

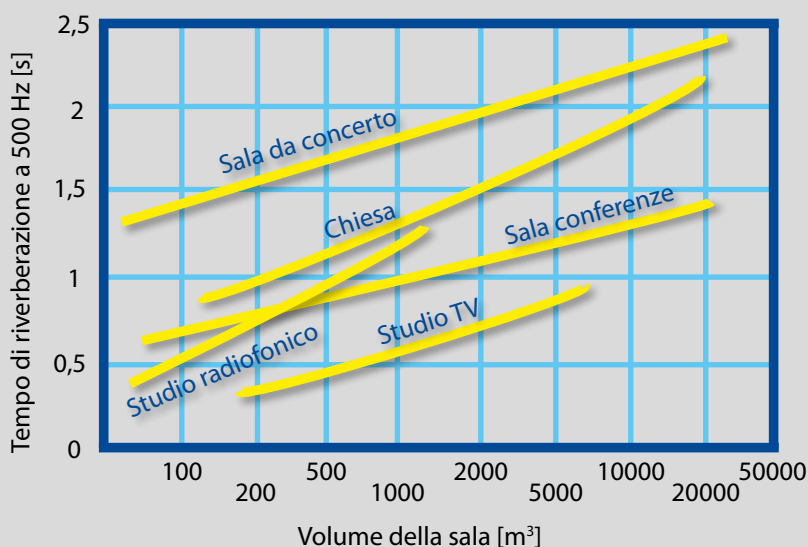
$$T_{60} = \frac{1}{6}\frac{V}{\sum S_n \alpha_n}$$

dove $\boldsymbol{V}$ è il volume della stanza espresso in m^3, S_n è la superficie n-esima dell'n-esimo materiale che costituisce le pareti della stanza espressa in m^2 e $\boldsymbol{\alpha_n}$ è il coefficiente di assorbimento dell'n-esimo materiale corrispondente.

- ***equazione di Eyring***: viene utilizzata quando il valore medio dei coefficienti di assorbimento è maggiore di 0,2 e per frequenze inferiori a 4 kHz. Al denominatore viene aggiunto un termine per considerare l'assorbimento dell'aria alle alte frequenze:

$$T_{60} = -\frac{1}{6}\frac{V}{S \cdot \ln(1-\overline{\alpha})}$$

Dove $\boldsymbol{S}$ è la superficie totale della stanza, mentre α è il coefficiente di assorbimento medio dei materiali presenti nella stanza.

Fig. 7 - Tempi di riverberazione tipici di alcuni ambienti.

2.7.2 Tempo di riverberazione ottimale

Nello studio della progettazione acustica di una sala è necessario tenere conto non solo dell'architettura della sala ma anche del suo volume, dell'arredamento dell'ambiente e dell'assorbimento complessivo, con e senza le persone all'interno.

É chiaro che la progettazione dipende espressamente dal fine di utilizzo della sala e, quindi, anche il tempo di riverberazione dovrà essere differente in base all'obiettivo. Risulta quindi necessario considerare il concetto di tempo di riverberazione ottimale, che caratterizza i vari ambienti.

In figura 7 è riportato un grafico che evidenzia alcuni tempi di riverberazione tipici in funzione del volume.

Il colore del suono tende a essere brillante se la riverberazione agisce sulle frequenze alte, mentre apparirà cupo se vengono esaltate le basse frequenze. Quindi si può affermare che per un buon ascolto il tempo di riverbero alle basse frequenze deve essere più alto: $T_{60}(bf) > T_{60}(af)$.

2.7.3 Distanza di riverberazione

La distanza di riverberazione è definita come la distanza dalla sorgente per cui il campo possa essere considerato "diffuso". Si considera un ambiente riverberante con una sorgente ***S*** e un ascoltatore ***A***. Il livello di pressione L_t percepito dall'ascoltatore è dato dalla somma di due pressioni: la radiazione diretta L_d, che rappresenta il livello di pressione sonora SPL (*Sound Pressure Level*) che arriva direttamente all'ascoltatore, e la radiazione riflessa L_r, che rappresenta il livello di pressione sonora dovuta alle riflessioni.

Per cui:

$$L_t = L_d + L_r$$

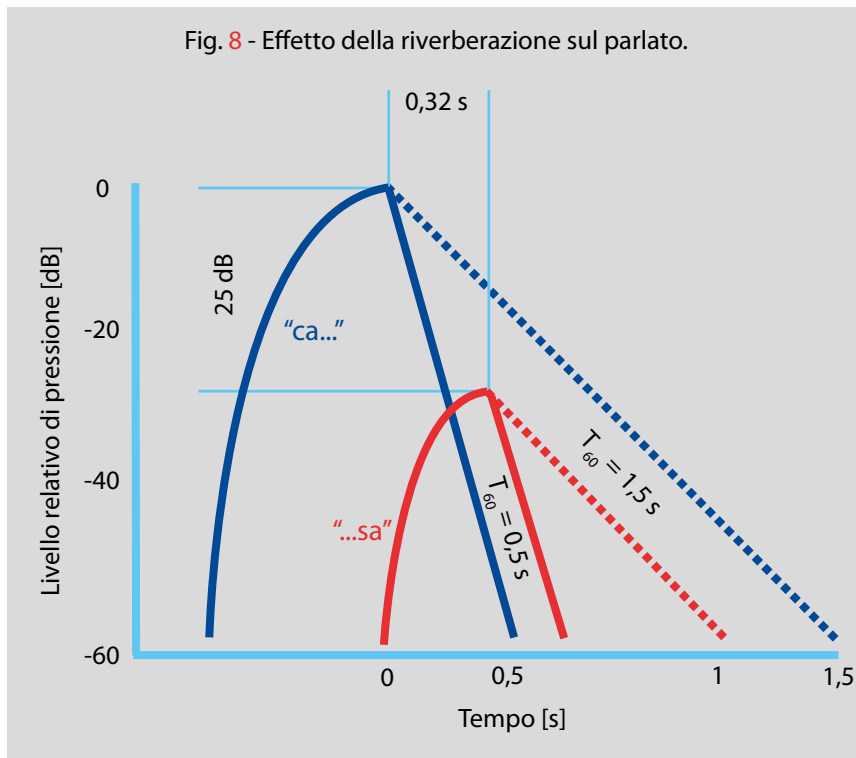
La distanza di riverberazione può essere calcolata mediante la relazione:

$$r_r = 0.25\left(\alpha \frac{S}{\pi}\right) \approx 0.06\sqrt{\frac{V}{T_{60}}}$$

2.7.4 Esempio: effetto del riverbero sul parlato

Per spiegare l'effetto della riverberazione, si può considerare un esempio in cui l'influenza del riverbero è evidente: si considera una parola di due sillabe, come ad esempio "casa". Si suppone che la sillaba "...sa" si trovi a 25 dB sotto il livello di picco della prima sillaba e che raggiunga il proprio picco 0,32 s dopo la prima. Entrambi i suoni sono transitori che crescono e decadono velocemente. In figura 8 viene raffigurato lo schema dei fattori: la sillaba "ca..." raggiunge il picco a un livello fissato arbitrariamente a 0 dB all'istante t = 0, successivamente decade a seconda del tempo di riverberazione della stanza (come ipotesi si considera che sia di 0,5 s). La seconda sillaba raggiunge il picco, come detto, 0,32 s dopo e decade sempre in 0,5 s. In questa situazione la sillaba "...sa" non viene mascherata dalla prima. Se invece il tempo di riverberazione della stanza fosse maggiore di 0,5 s, ad esempio 1,5 s (raffigurato con le linee tratteggiate), la seconda sillaba sarebbe completamente mascherata.

L'effetto principale di un'eccessiva riverberazione è quindi quello di compromettere l'intelligibilità del parlato (cosa molto comune in ambienti come chiese e palestre), mascherando i suoni consonantici di livello inferiore.

Fig. 8 - Effetto della riverberazione sul parlato.

Da questo esempio si può quindi concludere come in ambienti come parlatori, o comunque adibiti per l'ascolto del parlato, il tempo di riverberazione deve essere inferiore rispetto ad ambienti come sale da concerto.

2.8 Criteri Energetici

La fisiologia dell'apparato uditivo umano non permette di distinguere i suoni molto ravvicinati nel tempo (50 ms nel caso del parlato e 80 ms nel caso della musica) e le riflessioni vengono spesso interpretate come parte del suono diretto. L'energia che arriva prima di 50 ms si chiama energia utile, perché i contributi delle riflessioni si sommano al suono diretto, mentre l'energia che arriva dopo si chiama energia dannosa, perché rischia di danneggiare la percezione sonora.

Per valutare il contributo energetico, la norma ISO 3382[Nota 5] considera tre indici: *definizione*, *chiarezza* e *speech transmission*.

- ***Definizione***[Nota 6]: misura la chiarezza con la quale l'ascoltatore percepisce il messaggio parlato. È definito come il rapporto tra l'energia utile e l'energia totale.

$$D_{50} = \frac{\int_{0ms}^{50ms} p^2(t)dt}{\int_{0ms}^{\infty} p^2(t)dt}$$

dove $t = 0$ è l'istante in cui giunge l'impulso diretto. I valori ottimali sono compresi tra 0,3 e 0,7.

- ***Chiarezza***[Nota 7]: misura la possibilità di percepire nitidamente note musicali suonate in rapida successione. È il rapporto tra l'energia sonora ricevuta nei primi 80 ms del suono diretto e quella che giunge successivamente, espresso in dB.

$$C_{80} = \frac{\int_{0ms}^{80ms} p^2(t)dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t)dt}$$

I valori ottimali sono compresi tra -2 dB e +2 dB.

Nota 5 - stabilisce le procedure da seguire per la determinazione del tempo di riverbero negli auditori.
Nota 6 - *Early Energy Fraction*.
Nota 7 - *Early to late Sound Index*.

- ***STI***: è un parametro per valutare l'intelligibilità del parlato. È definito come un rapporto di energie.

$$STI = \frac{\int_{10ms}^{100ms} p^2(t)dt}{\int_{0ms}^{10ms} p^2(t)dt}$$

2.9 Eco

L'eco è un fenomeno fisico prodotto dalla riflessione delle onde sonore contro un ostacolo, causata dalla discontinuità del mezzo di propagazione. Le onde riflesse tornano all'emettitore con una certa intensità e un certo ritardo in modo da poter essere percepite separatamente da quella diretta.

Spesso si tende a confondere erroneamente l'eco con il riverbero. I due fenomeni si differenziano, infatti, per due parametri: il ritardo con cui l'onda riflessa torna all'emettitore e la distanza tra la sorgente e l'ostacolo. Affinché si parli di eco, il ritardo non deve essere inferiore a 1/10 di secondo, mentre la distanza minima deve essere pari a 17 m. Il valore di quest'ultimo parametro non è casuale: se infatti si considera che la velocità del suono in aria a 20°C è ≈340 m/s e che il ritardo è 1/10 di secondo, allora risulta che, in aria, il percorso totale è 34 m, cioè 17 m dalla sorgente all'ostacolo e 17 m per il percorso inverso.

3. Elementi di progettazione acustica degli ambienti chiusi

La progettazione acustica di un ambiente rappresenta un problema complesso da analizzare a causa della grande quantità di fattori che influiscono, e tutto ciò risulta amplificato nel caso in cui si considerino ambienti chiusi. Restringendo l'attenzione, per il momento, soltanto agli aspetti fisici, esistono modelli di calcolo che permettono di fare previsioni quantitative utili nell'ambito dell'acustica tecnica. Spesso, per un ambiente chiuso si distingue il problema della descrizione a bassa frequenza da quello ad alta frequenza, ovvero è possibile definire l'ambiente di dimensioni piccole o grandi a seconda della frequenza d'interesse. Come parametro di misura si considera la lunghezza d'onda e in particolare il rapporto tra le dimensioni lineari del locale e la

lunghezza d'onda. Ad esempio, una dimensione media dieci volte più grande della lunghezza d'onda definisce un ambiente di grandi dimensioni.

Se si considera la gamma di frequenze dell'udito umano, la lunghezza d'onda in aria a 20 Hz è pari a 17 m, mentre a 20 kHz è 1,7 cm.

3.1 Descrizione modale

La teoria modale permette di dare una descrizione del suono negli spazi chiusi molto accurata, in quanto è in grado di rappresentare in modo preciso gli aspetti della fenomenologia ondulatoria che spesso non vengono considerati da altri modelli.

Per chiarire il concetto è opportuno considerare la seguente situazione. Si consideri un ambiente parallelepipedo (figura 9), in cui gli spigoli, orientati lungo i tre assi, sono di lunghezza l_x, l_y e l_z.

All'origine del sistema di assi cartesiani viene collocata una sorgente puntiforme, che pulsa secondo la legge armonica semplice alla frequenza angolare ω con ampiezza P_0. Inoltre, si considerano le superfici interne come uniformi e poco assorbenti.

La soluzione dell'equazione delle onde, con il termine dovuto alla sorgente, nota come equazione di Helmotz non omogenea, fornisce il valore della pressione sonora ***p(x,y,z)*** come somma di una serie di funzioni complesse $p_n(x, y, z)$. Ciascuna funzione $p_n(x, y, z)$ rappresenta un modo naturale dell'ambiente:

$$p(x,y,z) = \sum_n p_n(x,y,z)$$

dove l'ampiezza del generico modo n è data dall'espressione:

$$|p_n(x,y,z)| = \frac{\rho_0 v^2 \omega P_0}{V \cdot \sqrt{4\omega_n^2 k_n^2 + (\omega^2 - \omega_n^2)^2}} \psi_n(x,y,z)$$

dove:

- ρ_0 è la densità dell'aria nell'ambiente espressa in kg/m³;
- ω è la frequenza angolare della sorgente;
- ω_n è la frequenza angolare naturale del modo ***n***;
- ***V*** è il volume dell'ambiente;
- k_n è la costante di smorzamento del modo ***n***;

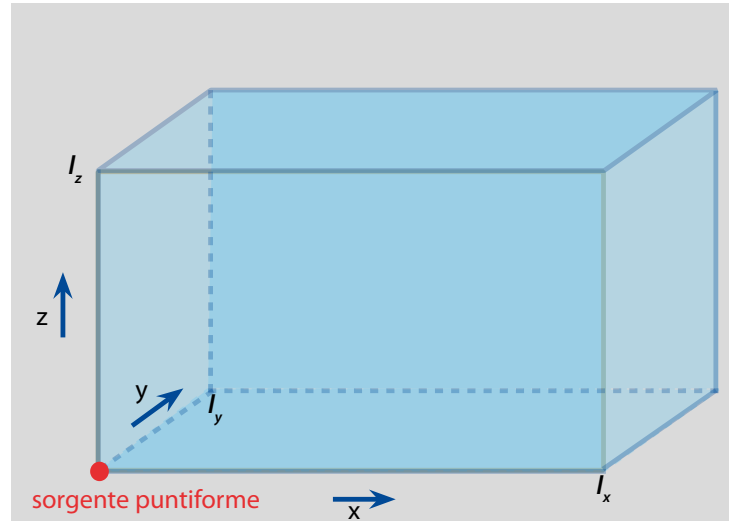



Fig. 9 - Stanza parallelepipeda con sorgente puntiforme.

- ψ_n (x, y, z) è la forma modale per il modo ***n***, che esprime la dipendenza dell'ampiezza del modo ***n*** dalle coordinate spaziali:

$$\psi_n(x,y,z) = \cos\left(\frac{n_x \pi x}{l_x}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_y \pi y}{l_y}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_z \pi z}{l_z}\right)$$

con n_x, n_y, n_z = 0,1,2,3,...;

La precedente relazione evidenzia come ogni modo sia individuato da una terna di numeri interi, detti numeri modali, ognuno dei quali può assumere qualsiasi valore a partire da 0.

La dipendenza spaziale di ciascun modo corrisponde a un campo stazionario tridimensionale dovuto a coppie di onde piane di uguale ampiezza e frequenza, che viaggiano in verso contrario lungo traiettorie rettilinee individuate dai rapporti n_x/l_x, n_y/l_y, n_z/l_z.

I modi si distinguono in tre categorie:

- ***modi assiali*** (figura 10): le onde componenti viaggiano lungo una direzione parallela ad un asse coordinato e interagiscono con la coppia di superfici contrapposte e ortogonali all'asse considerato. Questi modi sono contraddistinti da un solo numero modale non nullo, quindi la terna si presenta come (n_x, 0, 0), (0, n_y, 0) o (0, 0, n_z). Siccome dipendono da una sola coordinata si definiscono anche *modi monodimensionali*.

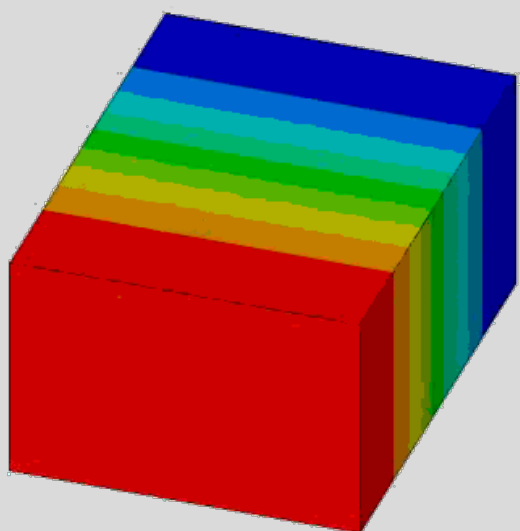



Fig. 10 - Modo assiale.

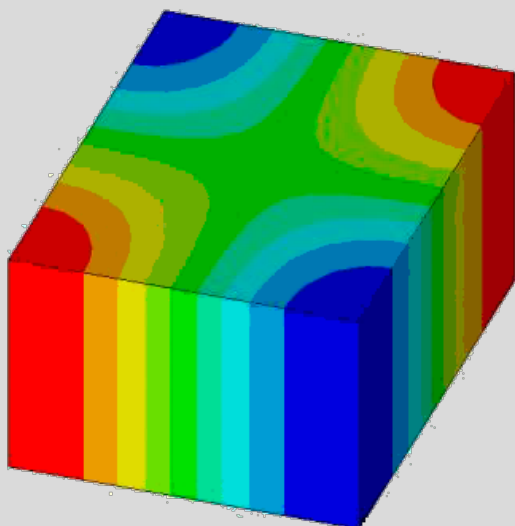



Fig. 11 - Modi tangenziali.

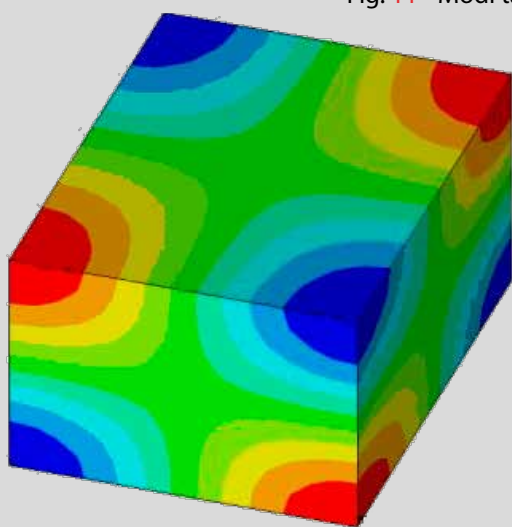



Fig. 12 - Modi obliqui.

Le figure 10, 11 e 12 sono tratte da *M. Fringuellino*, "Acustica dei piccoli ambienti" (seminario al Politecnico del 2009)

- ***modi tangenziali*** (figura 11): le onde componenti viaggiano lungo direzioni appartenenti a piani paralleli ai piani coordinati e interagiscono con due coppie di superfici contrapposte ortogonali al piano contenente le direzioni di propagazione. In questo caso la terna è caratterizzata da un solo numero nullo, quindi si presenta come (n_x, n_y, *0*), (n_x, *0*, n_z) o (*0*, n_y, n_z). Si definiscono anche *modi bidimensionali*.
- ***modi obliqui*** (figura 12): le onde componenti si propagano secondo direzioni oblique rispetto agli assi coordinati e interagiscono con tutte le coppie di superfici contrapposte del parallelepipedo. I numeri modali sono tutti diversi da 0, quindi, i modi (n_x, n_y, n_z) sono detti *modi tridimensionali*.

Da ciò si può affermare che:

- negli otto vertici del parallelepipedo tutti i modi contribuiscono alla pressione sonora.
- al centro dell'ambiente sono nulli tutti i modi per i quali almeno uno dei tre numeri modali è dispari. Quindi solo 1/8 dei modi disponibili contribuisce alla pressione sonora in quel punto.
- al centro di ciascuna faccia del parallelepipedo manca il contributo dei modi con due numeri modali dispari. Questo comporta che solo 1/4 dei modi possibili può contribuire alla pressione sonora nei punti considerati.
- al centro di ogni spigolo del parallelepipedo manca il contributo dei modi con un numero modale dispari. Quindi solo la metà dei modi possibili può contribuire alla pressione sonora in questi punti.

Le frequenze di risonanza dei modi sono date dalla relazione:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right) + \left(\frac{n_y}{l_y}\right) + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)}$$

Per quanto detto, un ambiente parallelepipedo può essere considerato come un sistema multirisonante. Rimane infine da capire come poter determinare quanti modi possono essere eccitati in risonanza facendo variare la frequenza tra 0 e ***f*** e chiarire il concetto di densità modale.

Il numero di modi può essere calcolato tramite la seguente relazione:

$$N = \frac{4\pi f^3 V}{3c^3} + \frac{\pi f^2 S}{4c^2} + \frac{f + L}{8c}$$

dove ***V*** è il volume dell'ambiente, ***S*** è l'area totale delle superfici, mentre ***L*** è la somma delle lunghezze degli spigoli del parallelepipedo. In realtà, per ambienti relativamente grandi gli ultimi due addendi possono essere trascurati, quindi la formula precedente si approssima come:

$$N \cong \frac{4\pi f^3 V}{3c^3}$$

La densità modale rappresenta il numero di frequenze di risonanza all'interno di una banda unitaria intorno alla frequenza ***f*** e può essere calcolata considerando la derivata della formula precedente rispetto alla frequenza:

$$n(f) = \frac{dN}{df} = \frac{4\pi f^2 V}{c^3}$$

Dato un certo volume ***V***, la densità modale cresce con il quadrato della frequenza. Questo comporta che alle basse frequenze pochi modi contribuiscono in modo efficace alla pressione sonora nell'ambiente, per cui il livello di pressione sonora in regime permanente sinusoidale fluttua spostandosi da punto a punto nell'ambiente. Alle alte frequenze, invece, corrisponde un'elevata densità di modi e le fluttuazioni di livello si riducono muovendosi all'interno dell'ambiente.

2 Parametri di progetto e scelta dei materiali

Testo e figure tratti dall'articolo di Leonardo Scopece e Alberto Ciprian pubblicato su Elettronica e Telecomunicazioni, Dicembre 2010

1. Elementi pratici di progettazione

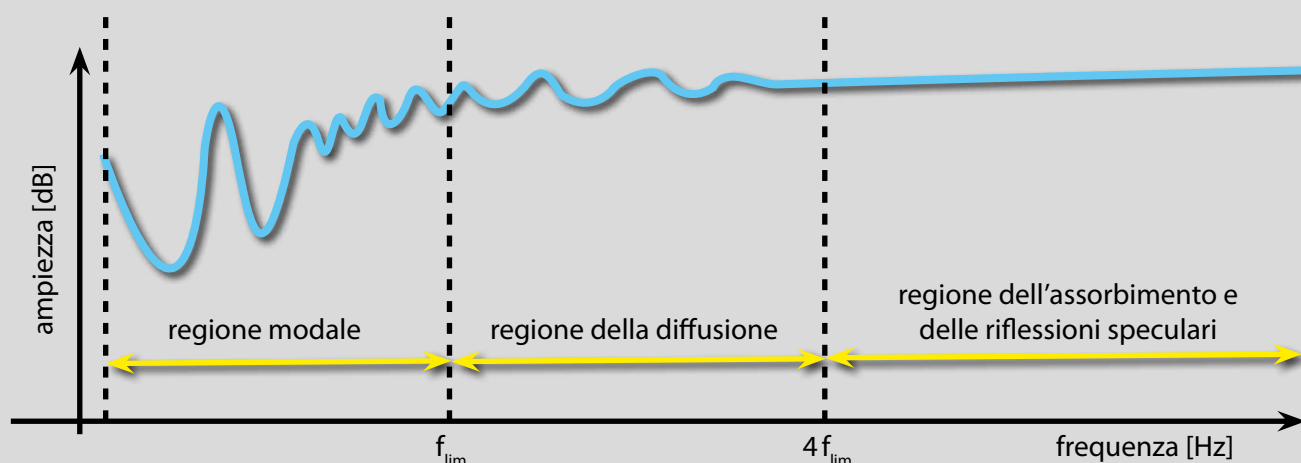
Quando si parla di progettazione acustica di un ambiente è necessario tener conto, oltre all'analisi modale, anche del concetto di frequenza limite, meglio conosciuta come frequenza di Schrœder. Questa rappresenta il limite inferiore delle frequenze in cui il campo sonoro assume connotati statistici e si calcola secondo la seguente relazione:

$$f_{\lim} = \frac{5000}{(V \cdot k_{n,\mathrm{mod}})^{1/2}} \cong 2000 \cdot \left(\frac{T}{V}\right)^{1/2}$$

dove $k_{n,mod}$ rappresenta il valore medio della costante di smorzamento di molti modi, T è il valore del tempo di riverberazione e V è il volume dell'ambiente. Al di sotto della frequenza di Schrœder prevalgono le caratteristiche modali legate all'ambiente.

Questa frequenza divide la risposta in frequenza del livello di pressione sonora in tre zone (figura 1):

- ***zona dominio modale***: prevale un comportamento deterministico in cui i modi sono pochi e la densità modale è bassa.
- ***zona di diffusione***: inizia il comportamento statistico dei modi che rende il campo diffuso e provoca un aumento della densità modale.
- ***zona di assorbimento***: in questa zona i modi sono molti e indistinguibili, quindi il comportamento dipende maggiormente dalle caratteristiche di assorbimento dell'ambiente.

Fig. 1 – Regioni di comportamento stazionario.

Siccome la frequenza di Schrœder dipende da $(T/V)^{1/2}$, si nota subito come negli ambienti di grandi dimensioni, in cui quindi il parametro V ha un valore grande, la considerazione dei modi perda di significato. Quindi la descrizione modale è necessaria prevalentemente per gli ambienti di piccole dimensioni. Tuttavia è pressoché impossibile fare previsioni quantitative sul comportamento acustico di un piccolo ambiente senza l'aiuto di un software dedicato, ed è necessario basarsi su alcuni parametri di progetto standard che possano approssimare al meglio il comportamento acustico della stanza. Generalmente si considerano quattro fasi:

- progettazione geometrica
- dimensionamento delle superfici
- scelta dei materiali
- posizionamento delle sorgenti e dell'ascoltatore

La progettazione di tipo geometrico (*geometrical design*) è uno dei metodi più importanti da considerare per ridurre il più possibile la presenza dei modi assiali all'interno dell'ambiente a favore di modi meno energetici. La scelta peggiore che si può adottare consiste nello scegliere una pianta a pareti parallele tra loro (soffitto e pavimento compresi) in quanto consentono la generazione di modi assiali e di onde stazionarie. É quindi necessario studiare soluzioni ad hoc per ogni ambiente, anche considerando il tipo di suono che deve essere riprodotto all'interno.

Il corretto dimensionamento dei lati della stanza è un altro parametro a cui bisogna prestare molta attenzione, poiché permette di aggirare l'ostacolo di avere le pareti parallele e non poter agire direttamente su esse. Come detto, è molto difficile prevedere la risposta modale della stanza, per questo motivo si può creare all'interno della struttura parallelepipeda un guscio a pareti non parallele. Ma questo procedimento, ovviamente, deve essere seguito tenendo conto di un corretto dimensionamento dei lati.

- ***Rapporti di Bolt***: si considera l'idea secondo cui si ha una migliore risposta in frequenza e un minore ROS[Nota 1] imponendo che i modi siano equispaziati in frequenza. I rapporti ottenuti sono 1 : 1,26 : 1,59 (considerando altezza, larghezza e lunghezza).
- ***Rapporti di Sepmeyer***: vengono definite tre famiglie di rapporti ottimali, a seconda che, a parità di altezza, si preferiscano stanza più o meno allungate. I rapporti sono elencati nella tabella seguente:

Altezza	*Larghezza*	*Lunghezza*
1	1.14	1.39
1	1.28	1.54
1	1.60	2.33

- ***Criterio di Bonello***: è un metodo basato sulla psicoacustica e utilizza un diagramma per verificare l'accettabilità di una distribuzione di modi. Sull'asse delle ordinate viene riportato il numero dei modi la cui frequenza naturale è contenuta

Nota 1 - acronimo per Rapporto di Onde Stazionarie, rappresenta la differenza, espressa in dB, fra massimi e minimi dei valori di livello di un'onda stazionaria.

Fig. 2 - Criterio di Bonello.

in bande a terzi di ottava, mentre sulle ascisse vengono riportate le bande a terzi di ottava. Secondo il criterio, il tracciato risultante deve essere crescente, cioè il numero di modi in una banda deve essere maggiore o uguale a quello contenuto nella banda precedente. Un esempio di applicazione di questo criterio è rappresentato in figura 2.

Infine, rimane la scelta sui dispositivi acustici e sui materiali da utilizzare. Quest'ultimo punto non si basa su precisi standard come può essere il dimensionamento delle pareti, perché, come detto ogni ambiente può essere realizzato con finalità diverse: un parlatorio avrà la necessità di avere un riverbero bassissimo, e al contrario un ambiente destinato alla riproduzione musicale necessiterà di un valore di riverbero più o meno alto a seconda del genere riprodotto.

Fig. 3 - Immagine valida.

Fig. 4 - Immagine non valida.

Fig. 5 - Algoritmo di ray tracing.

1.1 Misurazione impulsiva di una stanza

Spesso l'analisi modale non è sufficiente per studiare la risposta impulsiva di una stanza, in quanto va bene soltanto per ambienti parallelepipedi. Per questo motivo negli ultimi anni sono stati introdotti i cosiddetti metodi geometrici, in cui le onde sonore vengono trattate come i raggi luminosi, per i quali valgono le leggi di ottica geometrica di Snell. Inoltre, si suppone che l'angolo di incidenza e quello di riflessione siano uguali, ma questa affermazione a sua volta vale soltanto nel caso in cui si considerino due ipotesi: dimensione delle pareti grande e curvatura/irregolarità delle superfici riflettenti piccola rispetto alla lunghezza d'onda del suono.

I principali metodi utilizzati sono il ***metodo delle immagini*** e l'***algoritmo di ray tracing***.

1.1.1 Metodo delle Immagini

É un metodo basato sull'idea che ogni parete si comporta come uno specchio acustico e viene rimpiazzata da una sorgente immagine, detta anche sorgente fantasma.

Per valutare il procedimento è utile considerare un caso semplice in cui si considerano due pareti non perpendicolari tra loro e immagini fino al secondo ordine. In figura 3 si indica l'immagine del primo ordine relativa alla parete 2 della sorgente con I_2, mentre con $I_{1,2}$, si indica l'immagine del secondo

ordine generata da quella del primo ordine relativa alla parete 1. L'apice indica ordine dell'immagine, mentre il pedice indica la sequenza delle pareti che hanno generato l'immagine a partire dal ricevitore.

Per calcolare il percorso di propagazione dell'immagine si parte dal ricevitore e si risale fino alla sorgente mediante un processo di backtracking. Nel caso rappresentato $I_{1,2}$ è un'immagine valida, poichè si incontrano tutte le pareti. In figura 4, invece, è rappresentato il caso di un'immagine non valida.

Il raggio che parte dal ricevitore incontra la parete 1 e raggiunge l'immagine $I_{2,1}$. Proseguendo con il backtracking e tracciando la perpendicolare alla parete 1 non si incontra mai la parete 2, quindi è impossibile trovare un raggio emesso dalla sorgente che attraversi la parete 2, la parete 1 e giunga al ricevitore. Nel caso in cui le pareti fossero perpendicolari, $I_{2,1}$ e $I_{1,2}$ coinciderebbero. Per realizzare l'algoritmo è necessario determinare tutte le immagini.

Ad esempio, si consideri un ambiente con 6 pareti: la sorgente genera 6 immagini del primo ordine, ogni immagine del primo ne genera 5 del secondo, che a loro volta ne generano altre 5 del terzo e così via. Quindi, per una simulazione di ordine n il numero delle immagini da considerare sono:

$$N^{n}_{imm} = \sum_{i=1}^{n} p(p-1)^{i-1}$$

dove p indica il numero delle pareti.

1.1.2 Algoritmo Ray Tracing

Il modello che utilizza l'algoritmo di ray tracing si basa su una sorgente sonora che emette un numero finito di raggi sonori modellati come particelle sonore con emissione radiale. Nel loro percorso, le particelle incontrano degli ostacoli, i quali, a loro volta, emettono altre particelle sonore (figura 5).

I problemi che emergono però sono due:

1. il primo consiste nel fatto che bisogna approssimare un numero teoricamente infinito di raggi sonori. Il numero di raggi dipende soprattutto dalla forma e dalle dimensioni della stanza considerata. Infatti, per una stanza parallelepipeda il numero è contenuto, al contrario in una stanza complessa il numero cresce in modo esponenziale. Per controllare il numero di raggi emessi si utilizzano le tecniche dette *pyramid tracing* e *cone tracing*.

2. Il secondo consiste nelle dimensioni del ricevitore. É necessario, infatti, che le dimensioni del ricevitore non siano troppo piccole, in quanto si rischierebbe di non intercettare alcun raggio sonoro (figura 6).

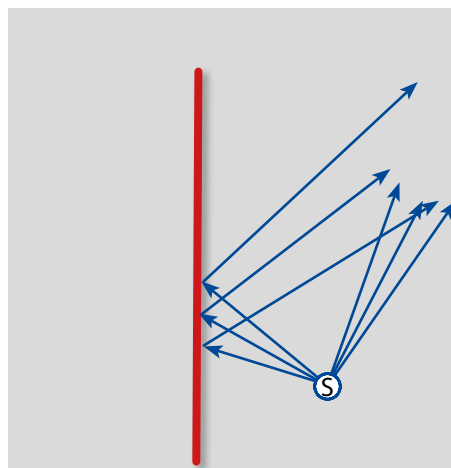



Fig. 6 - Problema delle dimensioni del ricevitore.

Da vari studi è emerso che la forma migliore per il ricevitore è sferica, inoltre Lehnert ha proposto, per la dimensione del ricevitore, di adottare una grandezza variabile a seconda del numero e della lunghezza dei raggi. La relazione che descrive questa soluzione è la seguente:

$$r = l \cdot \sqrt{\frac{2\pi}{N}}$$

dove l è la lunghezza del raggio, mentre N è il numero di raggi emessi. Il grande vantaggio di questi modelli consiste nel fatto di poter modellare in modo accurato fenomeni fisici come la diffrazione.

2. La coibentazione sonora

Una buona scelta dei materiali e una buona gestione delle superfici (soprattutto il pavimento) può permettere di ridurre notevolmente il numero di componenti aggiuntivi, lavorando sul trattamento di un largo range di frequenze e riducendo al mi-

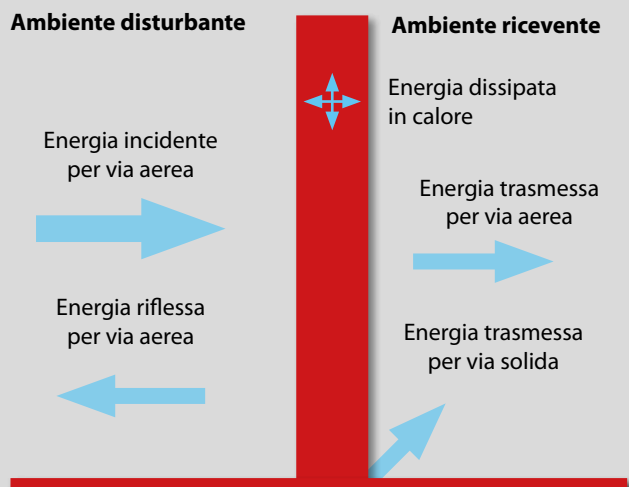



Fig. 7 - Trasmissione acustica.

nimo le vibrazioni prodotte dalla strumentazione presente nella camera (come strumenti musicali o componenti di un impianto).

Innanzitutto è necessario definire cosa si intende generalmente per isolamento acustico: è la capacità che una struttura ha di ridurre l'energia acustica che si propaga per via aerea dall'ambiente disturbante a quello ricevente. Quando un fronte d'onda incide su una superficie (figura 7) avvengono diversi fenomeni: l'energia che si propaga per via aerea viene trasformata in vibrazione meccanica della struttura; l'energia meccanica si ritrasforma parte in energia acustica che si propaga per via aerea, parte in energia dissipata in calore e parte in energia meccanica trasmessa per via solida ad altre strutture.

Questa può essere nuovamente irradiata dalle strutture eccitate nell'ambiente di ricezione (*flanking transmission*).

La norma ISO 31-7 prevede l'esistenza di quattro coefficienti:

- ***coefficiente di dissipazione δ***: rapporto tra la potenza sonora dissipata e potenza sonora incidente;
- ***coefficiente di trasmissione τ***: rapporto tra la potenza sonora trasmessa e potenza sonora incidente;
- ***coefficiente di assorbimento α***: rapporto tra potenza sonora assorbita e potenza sonora incidente. Vale la seguente relazione:

$$\alpha = \delta + \tau$$

- ***coefficiente di riflessione r***: rapporto tra la potenza sonora riflessa e la potenza sonora incidente. Vale la seguente relazione:

$$r + \delta + \tau = r + \alpha = 1$$

2.1 Il coefficiente di trasmissione

Il coefficiente di trasmissione è il rapporto tra la potenza sonora trasmessa e la potenza sonora incidente, ma siccome l'intensità sonora è definita come la potenza che fluisce attraverso una superficie di area unitaria perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda, il coefficiente di trasmissione **τ** può essere espresso anche come il rapporto tra l'intensità sonora trasmessa e quella incidente:

$$\tau(\theta) = \frac{I_t(\theta)}{I_i(\theta)}$$

da questa relazione si nota come questo coefficiente dipenda dall'angolo di incidenza **θ**, misurato rispetto alla normale alla superficie del divisorio.

Inoltre, **τ** è utilizzato anche per definire il concetto di potere fonoisolante ***R***[Nota 2] di una qualunque superficie divisoria, grandezza logaritmica espressa in dB:

$$R(\theta) = 10\log\frac{1}{\tau(\theta)}$$

nel caso in cui il fronte acustico incida sull'elemento in direzione normale alla superficie, quindi con **θ** = 0, si definisce il potere fonoisolante per incidenza normale. In realtà i fronti d'onda incidono sull'elemento da molti angoli contemporaneamente, quindi per tenerne conto è necessario effettuare una media sull'angolo di incidenza.

2.2 Il coefficiente di assorbimento

Le proprietà assorbenti dei materiali sono quantificate attraverso il coefficiente di assorbimento acu-

Nota 2 - in inglese Transmission Loss, TL.

stico α, che è definito come il rapporto tra la potenza acustica assorbita e la potenza sonora incidente:

$$\alpha = \frac{W_a}{W_i}$$

Il valore di α rappresenta quindi la frazione di energia sonora assorbita da un determinato materiale e può variare da 0, nel caso in cui tutta l'energia venga riflessa, a 1, nel caso in cui tutta l'energia venga assorbita. In figura 8, si può notare il fenomeno ripartizione della potenza sonora incidente: una parte viene riflessa (W_r), una parte viene assorbita (W_a) e una parte viene trasmessa (W_t).

Per uno stesso tipo di materiale, il valore del coefficiente di assorbimento può variare in base al valore della frequenza e dell'angolo di incidenza dell'onda acustica. Per questo motivo i coefficienti di assorbimento sono espressi in funzione della frequenza in banda di ottava o di 1/3 di ottava[Nota 3].

2.3 Determinazione del coefficiente di assorbimento

La misura in laboratorio dei valori dei coefficienti di assorbimento acustico avviene solitamente con due metodi:

- per incidenza diffusa in camera riverberante
- per incidenza normale in tubo a onde stazionarie

Il principio di misura per ***incidenza diffusa*** consiste nell'effettuare la misura del tempo di riverberazione in una camera riverberante, che secondo la norma UNI EN 20354 deve essere di superficie non inferiore a 10 m², con e senza il campione in esame. I risultati delle due misure vengono poi elaborati in modo da ottenere i valori di α in funzione della frequenza. La norma specifica, inoltre, i requisiti fondamentali della camera riverberante come il volume, maggiore di 150 m³, e la lunghezza massima interna l_{max}, minore di 1,9 $V^{1/3}$.

Nota 3 - Nelle schede tecniche fornite dai produttori compare spesso il coefficiente di riduzione del rumore **NRC**, *Noise Reduction Coefficient*, il quale è calcolato mediando i valori di α_{sabin} alle frequenze di 250, 500, 1000, e 2000 Hz. In alternativa si utilizza il coefficiente di assorbimento acustico ponderato α_w ottenuto mediante confronto con una curva di riferimento secondo il metodo indicato dalla norma UNI EN ISO 11654.

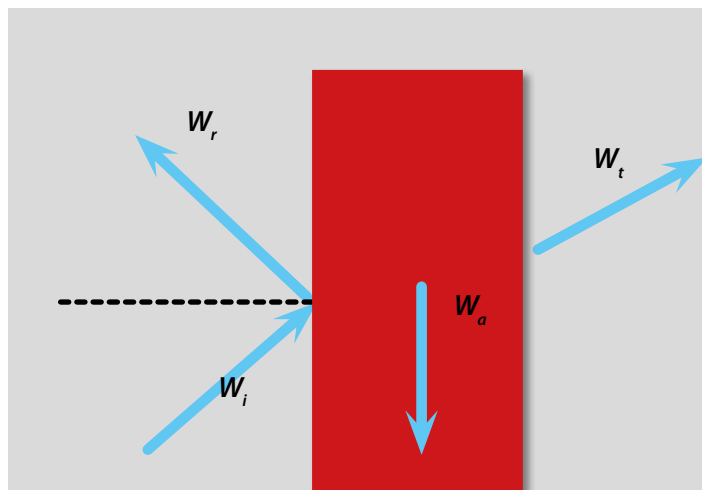



Fig. 8 - Ripartizione della potenza sonora.

La misura dei tempi di riverberazione viene eseguita per bande di 1/3 d'ottava nel campo di frequenze compreso tra 100 Hz e 5 kHz, inviando a un sistema di altoparlanti sistemato nella camera un rumore bianco, che viene periodicamente interrotto per permettere la misura del tempo di decadimento del segnale. Il segnale deve essere rilevato in almeno tre postazioni microfoniche fisse (distanti tra loro $\lambda/2$, a 1 m dal campione e a 2 m dalla sorgente) e inviato a un analizzatore digitale, che attraverso l'elaborazione di una serie di multispettri provvede a calcolare il tempo di riverberazione. L'area di assorbimento equivalente del materiale si ottiene tramite la seguente formula:

$$A = 55{,}3 \cdot \frac{V}{v} \cdot \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

dove T_1 è il tempo di riverberazione della camera vuota, T_2 è il tempo di riverberazione della camera contenente il campione, V è il volume della camera e v è la velocità di propagazione del suono nell'aria.

Il secondo metodo si basa sull'utilizzo di un tubo alle cui estremità vengono collocate una sorgente e un campione di prova. Il principio di misura consiste nella rilevazione, in termini di pressione sonora, dell'andamento dell'onda piana stazionaria che si crea nel tubo, a causa della sovrapposizione di un'onda incidente con l'onda riflessa dal campione in esame.

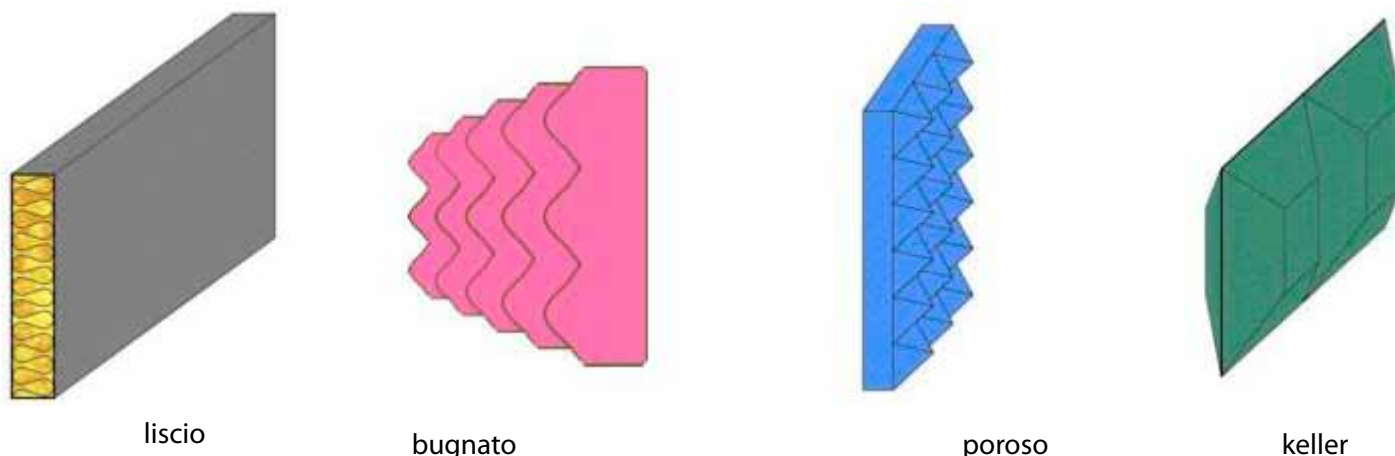



Fig. 9 - Tipologie di materiale poroso.

2.4 Tipologie di assorbimento

L'assorbimento acustico di un materiale avviene grazie alla conversione in calore di parte dell'energia incidente, anche se, nella realtà, è un meccanismo molto più complesso.

I principi attraverso cui un sistema assorbe energia sonora si possono suddividere in tre classi:

- assorbimento per ***porosità***;
- assorbimento per ***risonanza di membrana***;
- assorbimento per ***risonanza di cavità***.

Fig. 10 - Ampiezza dell'onda in funzione della distanza.

2.4.1 Assorbimento per porosità

L'assorbimento acustico di questa classe è dovuto al fenomeno della viscosità: la dissipazione dell'onda sonora avviene per trasformazione del suono in energia cinetica nel momento in cui viene attraversato il materiale. La superficie di un elemento è tanto più assorbente quanto maggiore e la sua capacità di trasformare l'energia sonora incidente in calore per attrito delle microcavità del materiale. I materiali migliori sono quelli porosi e fibrosi come: lana di vetro, lana di roccia, schiume di poliuretano espanso a celle aperte e feltri. Per questo tipo di materiali, il coefficiente di assorbimento dipende da:

- porosità;
- spessore;
- densità;
- forma;
- frequenza del suono incidente.

L'assorbimento per porosità risulta elevato alle frequenze medie e medio-alte, mentre per ottenere un significativo smorzamento delle basse frequenze è necessario l'utilizzo di spessori elevati di materiale. Per un uso efficace di un materiale fonoassorbente è necessario distanziarlo di qualche centimetro (tra 5 e 30 cm) dagli elementi strutturali piani.

Per aumentare il potere fonoisolante dei materiali porosi è consigliabile utilizzare materiale sagomato. In questo modo aumenta la superficie di contatto con l'onda sonora e quindi si ha una migliore dissipazione in energia cinetica (figura 9).

Fig. 11 - Sistemi fonoassorbenti per risonanza di membrana: sistema semplice (a) e sistema con interposto materiale poroso (b).

Come detto lo spessore del materiale condiziona molto la quantità di energia sottratta all'onda incidente. In prossimità di una parete rigida, il primo punto corrispondente al massimo della velocità di pressione delle particelle si trova a una distanza di ***λ/4*** (figura 10) dalla parete (distanza corrispondente alla massima ampiezza dell'onda da trattare). Da questo si deduce che ***α*** è crescente all'aumentare dello spessore per le basse frequenze, mentre cresce in misura poco significativa per le alte frequenze.

Molto spesso per migliorare l'efficienza del materiale alle frequenze medio-basse, si interpone un'intercapedine d'aria tra le superfici da trattare e il pannello assorbente, il quale dovrà essere collocato a una distanza dalla superficie corrispondente al massimo dell'ampiezza dell'onda sonora (cioè a ***λ/4***).

Una soluzione alternativa consiste nell'utilizzare materiali porosi con una maggiore densità, come il poliuretano espanso (massa: 30 kg/m^3 ca.) o lane minerali con densità fino a 100 kg/m^3.

2.4.2 Assorbimento per risonanza di membrana

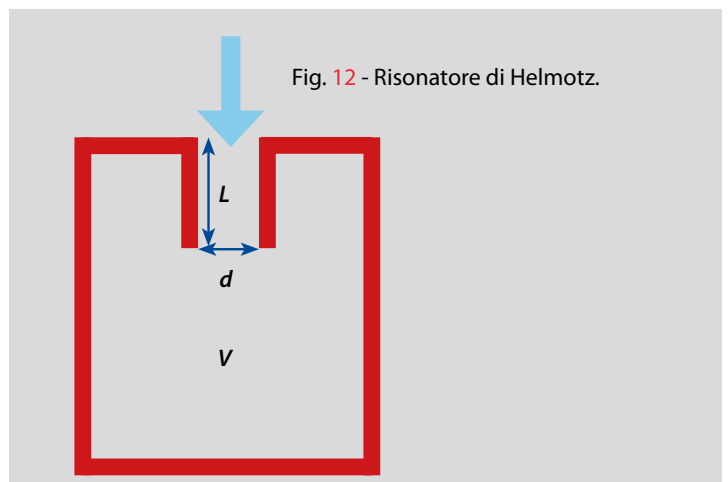
Questo tipo di assorbimento avviene tramite il posizionamento di un pannello di buona densità a una distanza di qualche decina di centimetri dalla parete, in modo che lo smorzamento si verifichi tramite un sistema massa-aria-massa che entra in gioco per realizzare prestazioni di tipo fonoisolante. Il pannello risuona alla sua frequenza di coincidenza e l'energia sonora viene smorzata dal cuscino d'aria retrostante. L'efficacia di questo sistema è limitata all'assorbimento delle frequenze per le quali avviene la risonanza. Tuttavia è sufficiente inserire del materiale fonoassorbente di tipo poroso o fibroso nell'intercapedine, per aumentare l'efficacia fonoassorbente su una gamma sonora più ampia (figura 11).

2.4.3 Assorbimento per risonanza di cavità

Per realizzare questo tipo di risonanza si utilizzano delle strutture costituite da pannelli di materiale non poroso (come una lastra di gesso) sui quali vengono praticati dei fori di opportune dimensioni e tali pannelli vengono montati a una certa distanza dalla superficie da trattare.

L'assorbimento avviene per viscosità che si realizza all'imboccatura di un'area cava all'interno del materiale, secondo il concetto del risonatore di Helmotz[Nota 5] (figura 12). La massa d'aria contenuta nei fori del pannello costituisce, con il volume

Nota 5 - la risonanza di Helmholtz è il fenomeno di risonanza dell'aria in una cavità.

Fig. 12 - Risonatore di Helmotz.

d'aria dell'intercapedine retrostante, un sistema meccanico del tipo massa-molla, dotato quindi di una sua frequenza di risonanza, in corrispondenza della quale il sistema è in grado di assorbire una considerevole parte di energia.

L'assorbimento di un risonatore di questo tipo è molto selettivo intorno alla frequenza di risonanza e quindi particolarmente efficace nel caso di toni puri di bassa frequenza compresi tra 50 e 400 Hz.

Nel caso in cui l'interno del materiale venga rivestito con materiale assorbente poroso, il valore del coefficiente di assorbimento alla frequenza di risonanza diminuisce, ma si allarga l'intervallo di frequenze in cui l'assorbimento è efficace. La frequenza di risonanza di questo tipo di pannelli è data dalla seguente relazione:

$$f_0 = \frac{v}{2\pi}\sqrt{\frac{P}{D \cdot L}}$$

dove ***P*** rappresenta la percentuale di foratura, ***v*** è la velocità di propagazione del suono, ***D*** è la distanza dalla parete (spessore dell'eventuale materiale poroso e dell'intercapedine) e ***L*** corrisponde alla lunghezza del collo del risonatore.

2.5 Classificazione dei materiali

I materiali utilizzati nel trattamento acustico degli ambienti vengono normalmente classificati in due categorie: fonoisolanti, quando sono caratterizzati dalla possibilità di minimizzare la potenza sonora trasmessa, e fonoassorbenti, che tendono a minimizzare la potenza riflessa.

I materiali fonoisolanti considerano, oltre al coefficiente di trasmissione, anche un parametro detto ***potere fonoisolante*** (***R***) espresso in dB, a cui viene associato lo stesso coefficiente di trasmissione ***t***:

$$R = 10\log\left(\frac{1}{t}\right)$$

Analizzando il comportamento dei materiali fonoisolanti in funzione della frequenza e del potere fonoisolante, si possono individuare quattro regioni di comportamento (figura 13):

- ***regione di rigidità*** del pannello: in cui il potere fonoisolante diminuisce di 6 dB/ottava;
- ***regione di risonanza***;
- ***regione di massa*** del pannello: in cui il potere fonoisolante aumenta di 6 dB/ottava;
- ***regione di coincidenza***: l'effetto diminuisce il potere fonoisolante del materiale.

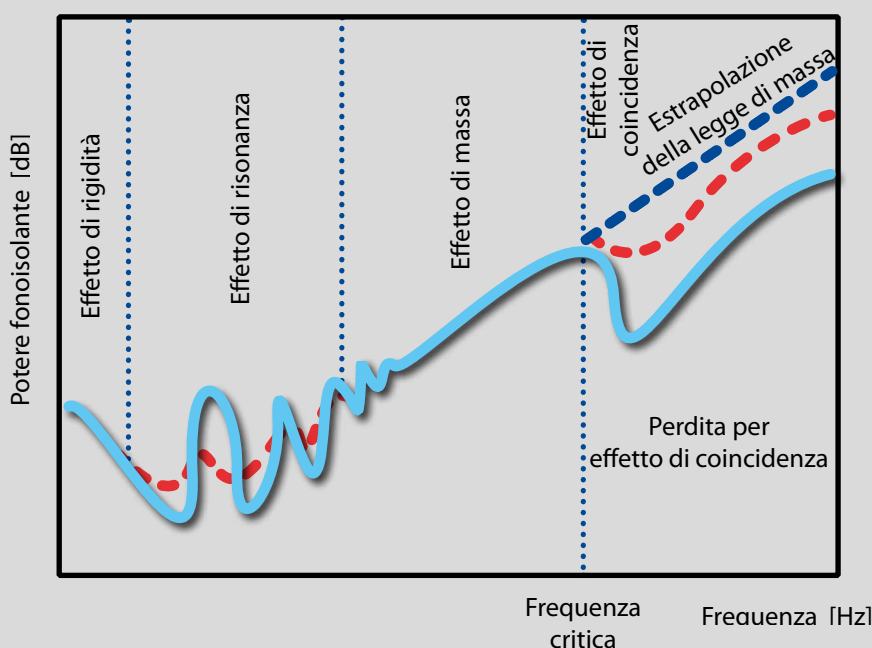



Fig. 13 - Comportamento dei materiali fonoisolanti. Sono messi a confronto gli andamenti della curva reale (continua), quella auspicabile (tratteggiata) e la estrapolazione della legge di massa.

Questa tipologia di materiali viene utilizzata soprattutto per determinate zone di una stanza come ad esempio il pavimento, in modo da attenuare sia le vibrazioni prodotte dalle onde sonore, ma anche quelle prodotte dai vari componenti presenti nella stanza.

I materiali fonoassorbenti, invece, sono utilizzati per controllare le riflessioni indesiderate, il riverbero e il rumore e generalmente sono caratterizzati da una bassa densità. Nell'ipotesi di campo acustico riverberante, il valore dell'attenuazione del livello sonoro (***DL***) espresso in dB conseguente all'installazione di materiale fonoassorbente sulle pareti vale:

$$DL(f) = 10\log\left(\frac{A_2}{A_1}\right)$$

dove ***A*** indica l'area equivalente di assorbimento data dalla relazione $\Sigma\, \alpha_i \cdot S_i$ (S_i indica l'i-esima superficie e α_i l'i-esimo coefficiente di assorbimento), mentre i pedici indicano l'area equivalente prima e dopo il trattamento acustico. A loro volta i materiali fonoassorbenti si dividono in quattro categorie:

- ***Porosi***: l'assorbimento è determinato dalla conversione in calore dell'energia meccanica trasportata dall'onda incidente e dipende da fattori come lo spessore del materiale e il posizionamento rispetto alla parete. Alcuni materiali di questo tipo sono lane di vetro e di roccia, schiume di poliuretano espanso a celle aperte, fibre di legno e feltri.
- ***Risonatori acustici***: sono schematizzabili come una cavità comunicante con l'esterno attraverso un foro praticato su una parete (detto collo). Quando l'onda colpisce l'ingresso del risonatore, l'aria contenuta in esso si comporta come un pistone, mentre quella contenuta nella cavità funge da elemento elastico del sistema. La frequenza di risonanza del risonatore è pari a:

$$f_0 = \frac{v}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{r^2}{V \cdot \left(l + \frac{\pi}{2r}\right)}}$$

  dove ***r*** ed ***l*** sono rispettivamente il raggio e la lunghezza del collo del risonatore, mentre V è il volume d'aria contenuto nella cavità. Se la frequenza dell'onda incidente è approssimabile a quella di risonanza, la velocità delle particelle d'aria contenute nel collo assume valori elevati e l'effetto dei fenomeni dissipativi raggiunge il suo massimo con conseguente assorbimento. Se, invece, la frequenza dell'onda incidente è diversa da quella di risonanza, l'onda non esercita alcuna influenza sul risonatore, che diventa quindi un assorbitore molto selettivo.
- ***Pannelli vibranti***: sono composti da pannelli rigidi piani disposti in modo parallelo a una certa distanza dalla parete. Questo sistema può anche essere pensato come una massa oscillante accoppiata a un elemento elastico con un certo smorzamento.

  La frequenza di risonanza di un pannello vibrante vale:

$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{d \cdot \sigma}}$$

  dove ***d*** indica la distanza del pannello dalla parete, mentre ***σ*** indica la densità superficiale del pannello espressa in kg/m^2.
- ***Sistemi misti***: sono costituiti da lastre rigide posizionate a una certa distanza dalla parete (a seconda dell'effetto che si vuole ottenere). Sulla superficie delle lastre vengono praticati dei fori di diverse dimensioni. L'intercapedine che si viene a creare posizionando le lastre può essere riempita con del materiale poroso in modo da aumentare il livello di assorbimento complessivo.

2.6 Trattamento acustico delle sale di piccole dimensioni

A differenza dei grandi ambienti, in cui il problema maggiore è realizzare una struttura diffusiva in grado di far sì che la resa acustica sia accettabile in ogni singolo punto, nei piccoli ambienti bisogna cercare di limitare tutti i fenomeni in grado di compromettere la qualità del suono riprodotto, come ad esempio la creazione di onde stazionarie o un'eccessiva riflessione. Per questo motivo, risulta fondamentale agire in modo opportuno su qualsiasi elemento architettonico della stanza: pavimento, soffitto, pareti, porte e, eventualmente, finestre.

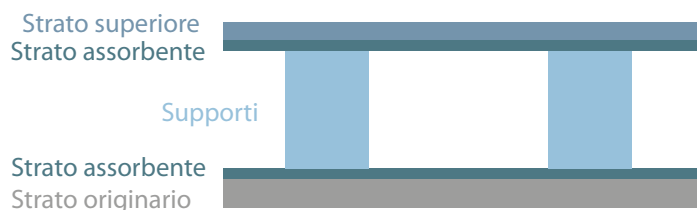



Fig. 14 - Possibile realizzazione del pavimento.

Fig. 15 - Ammortizzatore.

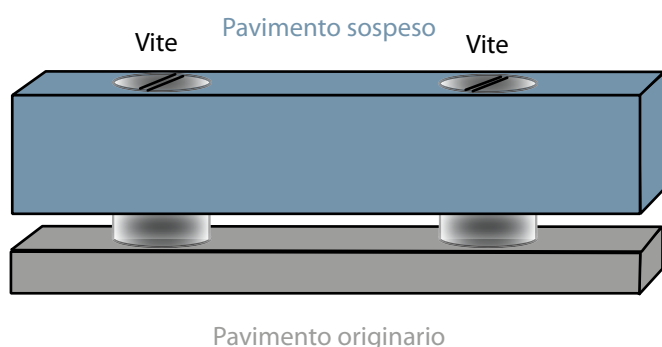



Fig. 16 - Soluzione alternativa per il pavimento.

Fig. 17 - Finestra per uno studio di registrazione.

É necessario, inoltre, tener sempre conto del tipo di applicazione per cui si realizza un ambiente e soprattutto del tipo di suono che verrà riprodotto al suo interno. Quindi, l'uso ai fini acustici di una superficie può essere effettuato privilegiando, per ciascuna superficie, una o più modalità di interazione:

- l'***assorbimento*** è utile quando si deve estrarre energia sonora in eccesso dal campo sonoro, in modo da controllare il riverbero complessivo;
- la ***riflessione speculare*** si utilizza quando è necessario indirizzare un'onda secondo una direzione particolare in modo da rafforzare la percezione del suono diretto in un certo punto della sala;
- la ***riflessione diffusa*** è, invece, utile quando è necessario ridurre le riflessioni speculari senza utilizzare materiali fonoassorbenti aggiuntivi che impoverirebbero il campo sonoro.

É da notare, inoltre, come la gestione di pavimento e soffitto sia la più complessa, sia per il fatto che difficilmente si possono fare correzioni acustiche successive alla loro realizzazione, cosa che è possibile invece fare con le pareti aggiungendo diversi tipi di componenti, ma anche perchè è molto difficile spezzare in modo efficace la simmetria e il loro parallelismo.

Di seguito vengono evidenziate alcune possibili soluzioni per le varie parti di una stanza.

✓ ***Pavimento***: ha il compito fondamentale di ridurre al minimo le vibrazioni prodotte dal calpestio e dalla strumentazione presente nella stanza, oltre ovviamente a contribuire all'assorbimento acustico. Nel caso in cui sia possibile agire a livello strutturale (modificando quindi la conformazione vera e propria del pavimento) esistono due tecniche che si differenziano principalmente per costo e versatilità, in caso contrario è necessario concentrarsi sui materiali e sulle loro capacità di assorbire le onde sonore.

La prima soluzione consiste nel realizzare una struttura "a strati" (figura 14), ovvero partendo dal pavimento originario si colloca uno strato di materiale in grado di assorbire le vibrazioni trasmesse dal pavimento base (come ad esempio il neoprene).

Successivamente si collocano delle strutture di

sostegno in modo da creare un'intercapedine vuota tra lo strato inferiore e quello superiore; queste strutture possono essere semplici assi di legno o meglio ancora elementi ammortizzatori (figura 15) i quali contribuiscono sia alla realizzazione dell'intercapedine sia alla gestione delle vibrazioni complessive.

Al di sopra si colloca un ulteriore strato di materiale assorbente per gestire le vibrazioni prodotte dalla superficie calpestabile, che può ad esempio essere di legno (parquet). Grazie a questa struttura, l'aria contenuta nell'intercapedine svolge il ruolo di isolante.

Una soluzione più complessa e costosa da realizzare, ma allo stesso tempo migliore di quella appena descritta, consiste nel realizzare un pavimento sospeso (figura 16), ma con un procedimento differente. Infatti, sopra al pavimento originario viene collocato quello calpestabile con delle grosse viti all'interno. In questo modo è possibile alzare o abbassare il pavimento a piacere, offrendo anche la possibilità di aumentare o diminuire la quantità d'aria nell'intercapedine.

Nel caso in cui non sia possibile agire a livello strutturale è necessario scegliere in modo adeguato i materiali con i quali rivestire la superficie di base.

Una possibile soluzione consiste nello stendere uno strato di materiale fonoisolante, come il feltro di poliestere e i materassini in polietilene direttamente sul pavimento, in modo da assorbire le vibrazioni da calpestio. Al di sopra la scelta dei materiali può essere duplice. Una soluzione consiste nell'utilizzare una moquette di spessore di circa 8 mm costituita da poliammide al 100%, con un coefficiente di assorbimento sotto a 0,5 alle alte frequenze; questa soluzione ha il vantaggio di evitare le riflessioni accoppiate tra soffitto e pavimento, ma ha il problema di assorbire prevalentemente le frequenze medio-alte, con la necessità di utilizzare soluzioni nella stanza per catturare le basse frequenze. La seconda soluzione consiste, invece, nell'utilizzo di un materiale simile a quello di un tappeto cordato con massa superficiale di circa 5÷8 mm e superficie inferiore in gomma, in modo da assorbire almeno in parte le basse frequenze. Il parametro legato allo spessore del materiale non è da sottovalutare, in quanto in base allo spessore si può scegliere il grado di assorbimento.

- ✓ ***Soffitto***: come per il pavimento, la soluzione migliore consiste nella creazione di un'intercapedine d'aria tramite la sospensione di un secondo strato attraverso dei ganci. Volendo aumentare il grado di assorbimento è sufficiente aggiungere del materiale fonoassorbente all'interno della cavità.
- ✓ ***Pareti***: è fondamentale cercare di ridurre il più possibile il parallelismo e la regolarità tra il lati, in modo da evitare la presenza di modi assiali con conseguente generazione di onde stazionarie che comporterebbero un peggioramento della resa sonora complessiva. Anche in questo caso è possibile agire in diversi modi più o meno "invasivi". A livello strutturale, si può agire in modo simile a quanto detto per soffitto e pavimento, isolando le pareti esterne dagli altri elementi architettonici, inserendo del materiale fonoassorbente tra la superficie di base e quella aggiunta. In caso non sia possibile, per quanto riguarda l'assorbimento basta ricoprire la parete con un materiale fonoassorbente avente un coefficiente di assorbimento più o meno elevato, a seconda dell'effetto che si vuole ottenere, mentre per quanto riguarda la riduzione della regolarità e la gestione delle riflessioni si possono utilizzare componenti come bass traps e diffusori (che verranno trattati in seguito), che oltre ad agire a livello geometrico spezzando il parallelismo, consentono anche di gestire le basse frequenze e controllare i percorsi delle onde sonore.
- ✓ ***Porte***: anche sulle porte è possibile agire in modo da isolare l'interno dell'ambiente dall'esterno. Una possibile soluzione consiste nel creare una doppia porta in modo da interrompere la trasmissione del suono sigillando ogni fessura con delle guide di gomma.
- ✓ ***Finestre***: sono elementi che possono incidere molto sulla scena sonora in quanto favoriscono le riflessioni. Per questo motivo o si ricopre il vetro con un materiale fonoassorbente, oppure si realizza un sistema formato da due vetri di un certo spessore, in modo da creare all'interno l'isolamento acustico, inclinando uno dei due (figura 17) per evitare il parallelismo e quindi un effetto di risonanza. Quest'ultima soluzione viene impiegata soprattutto in ambienti come studi di registrazione in cui è necessario inserire una finestra per comunicare visivamente tra la sala da registrazione e la regia audio.

3 Allestimento interno degli ambienti

Testo e figure tratti dall'articolo di Leonardo Scopece e Alberto Ciprian pubblicato su Elettronica e Telecomunicazioni, Aprile 2011

1. Sistemi di diffusione e trattamento acustico

Molto spesso nella progettazione acustica di una sala non basta scegliere una pianta irregolare e dimensionare ad hoc i lati per creare le condizioni ottime per l'ascolto, ma è necessario agire in un secondo tempo per introdurre delle correzioni tecniche per veicolare le onde sonore in un certo modo e per equalizzare alcune gamme di frequenza specifiche, perché l'azione più o meno assorbente dei materiali non è sufficiente.

Per questo motivo si ricorre all'utilizzo dei sistemi di diffusione e assorbimento, che possono essere semplici componenti da aggiungere come *bass trap* ("trappola" per le basse frequenze) o *diffusori cilindrici*, oppure vere e proprie realizzazioni costruite appositamente per ricreare sensazioni sonore particolari, come nel caso dei sistemi home theatre o dei sistemi surround professionali.

1.1 Componenti

I componenti tecnici per agire sulla propagazione delle onde sonore sono di vario tipo, ma generalmente si possono distinguere in tre categorie:

- diffusori (piani, curvi, di Schrœder)
- bass trap
- DaaD

Ogni componente, ovviamente, è realizzato con un diverso tipo di materiale a seconda della funzione che deve svolgere. Ad esempio un diffusore curvo sarà costituito da un materiale meno assorbente rispetto a quello di un bass trap che ha il compito di assorbire le basse frequenze.

1.1.1 Diffusori

I diffusori sono componenti acustici basati generalmente sulle leggi fisiche della riflessione delle onde e hanno lo scopo di diffondere il suono in determinate direzioni contribuendo all'aumento della qualità complessiva della stanza.

Ne esistono tre categorie:

✓ ***diffusori piani***: sono della tipologia più semplice e sono costituiti essenzialmente da un piano di legno. Il loro comportamento è diverso a seconda della frequenza considerata, per questo motivo vengono definite due frequenze limite f_s e f_i.

Se si considera lo schema in figura 1, allora le frequenze limite valgono:

$$f_s = v \cdot \left[\left(\frac{1}{s} + \frac{1}{r} \right) + B^2 \cdot cos^2 \vartheta \right]^{-1}$$

$$f_i = \left[\left(\frac{1}{s} + \frac{1}{r} \right) + A^2 \right]^{-1}$$

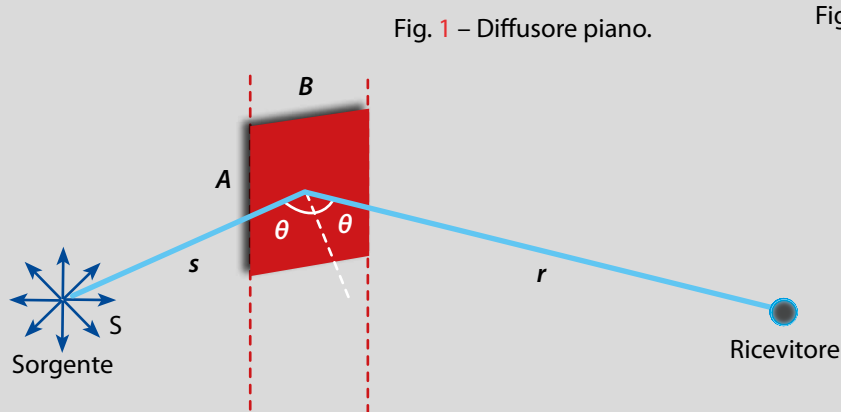
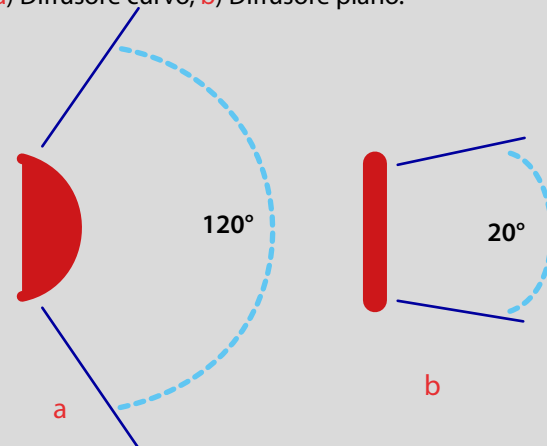



Fig. 1 – Diffusore piano.

Fig. 2 - a) Diffusore curvo, b) Diffusore piano.

Alle alte frequenze, superiori a f_s, l'onda è trasmessa in modo speculare e il diffusore si comporta come se fosse di estensione infinita, nell'intervallo compreso tra le due frequenze limite si ha un'attenuazione di 3 dB/ottava, mentre alle basse frequenze, inferiori a f_i, si verifica una diffrazione a causa di un'attenuazione che aumenta di 6 dB/ottava al diminuire della frequenza. Quando si analizzano frequenze superiori a f_s il pannello si comporta come se fosse un piano di larghezza ***B*** e di lunghezza ***A*** infinita. I valori ***s*** e ***r*** sono le distanze del pannello dalla sorgente e dal ricevitore, rispettivamente.

- ✓ ***diffusori curvi***: sono realizzati utilizzando superfici convesse in legno compensato o truciolato per diffondere il suono con angolo di irradiazione crescente all'aumentare del raggio di curvatora. Questi elementi fungono da assorbitori nella gamma delle basse frequenze, mentre la porzione irradiata è praticamente uguale a quella incidente, ad esempio, su un angolo di circa 120° (figura 2a), mentre un diffusore piano irradia il suono con un angolo molto più stretto (circa 20° - figura 2b).

  Tutto ciò fa capire come generalmente si preferiscano i diffusori curvi sia nei piccoli che nei grandi ambienti. Le dimensioni del diffusore vanno sempre rapportate alla lunghezza d'onda del suono.

- ✓ ***diffusore di Schrœder***: sono sistemi acustici passivi[Nota 1] molto efficienti, costituiti da superfici sagomate "a greca" con una profondità proporzionale alla lunghezza d'onda di progetto (figura 3), mentre le fessure devono avere una larghezza minore della metà della minima lunghezza d'onda d'interesse.

Il modello matematico su cui si basa l'idea di questi diffusori è quello della serie di residui quadratici, che si ottiene scegliendo un numero primo ***N***, elevando al quadrato i numeri compresi tra 0 e ***N-1*** e dividendo il valore ottenuto per ***N***. La serie dei resti di ogni divisione costituisce la serie di residui quadratici.

Nota 1 - cioè, non contengono sistemi di altoparlanti.

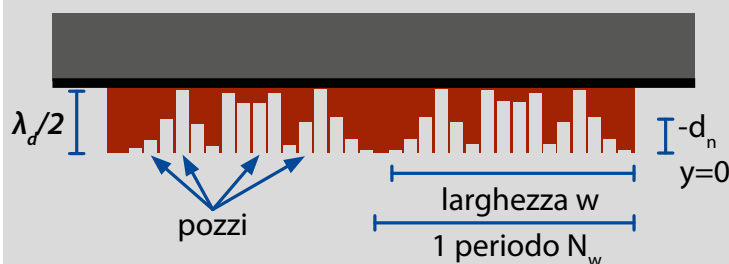



Fig. 3 - Schema e immagine del diffusore di Schroder.

Fig. 4 - Esempio di bass traps angolari.

Fig. 5 - Possibile collocazione in una sala prove.

Fig. 6 - DaaD.

Per progettare un diffusore di Schrœder si devono seguire alcuni passi:

3. si sceglie il campo di frequenza in cui si desidera lavorare per ottenere una diffusione uniforme definendo una frequenza inferiore f_i e una frequenza superiore f_s;
4. si calcola il periodo da assegnare alla sequenza di fessure pari al numero primo più vicino al rapporto delle frequenze scelte in precedenza, quindi:

$$N = \frac{f_s}{f_i}$$

5. si definisce una lunghezza d'onda di progetto λ_s come la massima da diffondere:

$$\lambda_s = \frac{v}{f_i} = \frac{340}{f_i}$$

6. si calcola la larghezza w delle fessure come:

$$w = \frac{v}{2f_s} = \frac{340}{2f_s}$$

7. infine si calcola profondità:

$$d_n = \frac{\lambda_s \cdot S_n}{2N}$$

dove S_n indica il valore n-esimo della sequenza di residui quadratici.

1.1.2 Bass trap

I bass trap (figura 4) sono classificate come assorbitori acustici e sono utilizzati per ridurre in modo efficiente l'energia delle componenti del suono alle basse frequenze e per contrastare le risonanze.

Come tutti i dispositivi di assorbimento acustico, anche i bass trap lavorano dissipando l'energia sonora in calore per effetto dell'attrito. Grazie alla loro

funzione vengono utilizzate soprattutto in ambienti in cui è necessario mantenere un suono chiaro e di ottima qualità, come ad esempio gli studi di registrazione e le regie audio. Generalmente vengono collocate in punti in cui si prevede la formazione di risonanze come gli angoli (figura 5).

1.1.3 DaaD

I DaaD[Nota 2] (figura 6) sono dei sistemi acustici passivi (che non hanno quindi un'amplificazione interna) che permettono di equilibrare il suono in base all'utilizzo scelto per la sala e al tipo di resa acustica che si vuole ottenere.

Ciò è reso possibile dal fatto che ogni DaaD è formato da un lobo diffondente, mentre gli altri sono tutti assorbenti. In questo modo è possibile ruotare il dispositivo al fine di ottenere particolari effetti e un miglior controllo del suono alle varie frequenze senza dover ricorrere ad altri sistemi di trattamento acustico. Questi sistemi possono quindi considerarsi come un'evoluzione e un miglioramento di sistemi come i bass trap.

Il loro rendimento è dovuto in gran parte alla tipologia di materiali di cui sono composti: la superficie esterna è formata da lastre di lamierino microforato, in modo tale da permettere alle onde sonore di entrare all'interno del dispositivo, in cui incontrano del materiale fonoassorbente.

Il funzionamento è basato sulla differenza di pressione che si crea tra l'interno e l'esterno del dispositivo nel momento in cui all'interno dell'ambiente in cui è posto il DaaD viene riprodotto un suono. Questa differenza, a sua volta, provoca uno spostamento d'aria all'interno del DaaD e, a causa dell'attrito prodotto dai materiali resistivi, viene ridotta l'energia sonora.

Ne esistono tre tipologie differenti (DaaD 2, DaaD 3, DaaD 4), che si differenziano in base alla gamma di frequenze che trattano e alla loro dimensione. In particolare: i DaaD 2 funzionano per risonanze superiori a 120 Hz, i DaaD 3 per risonanze superiori a 70 Hz e i DaaD 4 per risonanze superiori a 50 Hz.

Un altro aspetto che non deve essere trascurato è il posizionamento all'interno dell'ambiente. Infatti, essi agiscono sulla pressione sonora, quindi vanno collocati nei punti in cui la pressione stessa assume valori molto alti, come, ad esempio negli angoli e vicino a componenti come un subwoofer. Normalmente, per un ambiente di medie dimensioni ne servono almeno 10÷12, montati a colonna negli angoli. Ovviamente, volendo realizzare un trattamento ancora più efficace, ma molto più costoso, è possibile disporne un certo numero lungo le pareti, sempre controllandoli in punti in cui si concentra la pressione, perché se da un lato il grande vantaggio dei DaaD è quello di non colorare il suono, è anche vero che un errato posizionamento provoca un trattamento di scarsa qualità che ha come unico risultato un peggioramento della resa acustica.

Nota 2 - *Diffusion Absorption Acoustic Devices.*

1.2 Posizionamento dei componenti in base alle sorgenti virtuali

Il posizionamento dei vari componenti, i DaaD, nella stanza può essere studiato considerando, insieme ai metodi visti in precedenza, anche la teoria delle sorgenti virtuali.

Secondo questa teoria è possibile localizzare in modo abbastanza preciso quali zone delle pareti di una stanza sono interessate dalle onde propagate dalle sorgenti. Questo dato è molto importante per capire sia dove posizionare i componenti, ma anche per avere idea del numero di componenti necessari.

Il principio che sta alla base della teoria sostiene di considerare ogni parete come un asse di simmetria, in modo tale da riflettere ogni sorgente rispetto a tutte le pareti. Successivamente si traccia una linea di collegamento verso il punto di ascolto e si considera la copertura. Effettuando lo stesso procedimento per tutte le sorgenti virtuali si ottiene la copertura generale sulle pareti. In figura 7 è rappresentato l'esempio di una stanza in cui è stato realizzato un sistema di diffusione multicanale. I rettangoli al centro rappresentano la zona d'ascolto attorno alla quale sono collocati gli altoparlanti reali. Le zone colorate sulle pareti indicate sulle pareti rappresentano i punti in cui vanno collocati i componenti (distanziati tra loro di circa 40 cm), il numero di componenti è indicato nella legenda.

1.3 Sistemi Surround

Rappresentano l'evoluzione dei sistemi di diffusione stereo, i quali sono in grado di riprodurre soltanto due canali (destro e sinistro). I normali sistemi ste-

Fig. 7 - Esempio di applicazione della teoria delle sorgenti virtuali .

reo lasciano un “buco” al centro del fronte sonoro, che viene però ricostruito virtualmente dal cervello dando un’immagine fantasma. É però da notare che essendo un fenomeno psicoacustico, l’immagine fantasma tende a spostarsi in funzione della posizione dell’ascoltatore. Per ovviare a questo inconveniente e per fare in modo di ricreare una scena sonora il più possibile immersiva, sono stati sviluppati sistemi surround, cioè tecnologie in grado di distribuire il suono attorno all’ascoltatore utilizzando un certo numero di altoparlanti a seconda del formato. I formati più diffusi sono il 5.1 e il 7.1, dove il primo numero indica la quantità di altoparlanti, mentre il numero dopo il punto indica la presenza di un elemento dedicato alla riproduzione delle basse frequenze (il subwoofer).

In questo modo è possibile inviare diversi tipi di segnale alle varie casse. Ad esempio, la riproduzione di film prevede la presenza di segnali corrispondenti a dialoghi principali, che vengono inviati al canale centrale, segnali legati alla musica ed effetti particolari, che vengono inviati alle casse laterali, e segnali corrispondenti a effetti secondari e rumori, che vengono inviati anche ai canali posteriori. Tutte le componenti a bassa frequenza (<110 Hz) vengono riprodotte dal canale LFE[Nota 3]. Nel caso della riproduzione di eventi reali registrati, questi sistemi permettono una totale immersione nella scena, tutto dipende in realtà anche dalla qualità della registrazione (ottima nei casi di utilizzo ad esempio di una sonda VMS 3D[Nota 4] o un microfono per l’olofonia).

Il posizionamento delle casse, la loro distanza dall’ascoltatore e la loro altezza non è casuale, ma è standardizzata dalla norma ITU-R BS 775:

- ✓ l’altezza della cassa deve essere di 1.20 m in modo da essere all’incirca coplanare con le orecchie dell’ascoltatore;
- ✓ la distanza dall’ascoltatore può essere scelta tra due opzioni: 2.4 m (casse anteriori) e 1.8 m (casse posteriori), oppure 3.5 m (casse anteriori) e 2.4 m (casse posteriori);
- ✓ gli angoli con cui orientare le casse sono invece schematizzati in figura 8[Nota 5].

Nota 3 - *Low Frequencies Emitter*.
Nota 4 - *Virtual Microphone System 3D*. Sonda formata da 32 capsule disposte su una sfera, equispaziate dal centro e posizionate secondo un certo valore di azimuth ed elevazione. I segnali acquisiti dalle capsule vengono preamplificati, codificati, multiplexati ed infine inviati tramite un cavo ethernet a un’interfaccia collegata a un computer al fine di sintetizzare più microfoni virtuali, i quali in fase di postproduzione possono essere modificati al fine di aumentarne la direttività.
Nota 5 - per semplificare la rappresentazione grafica le casse vengono disposte attorno a una circonferenza.

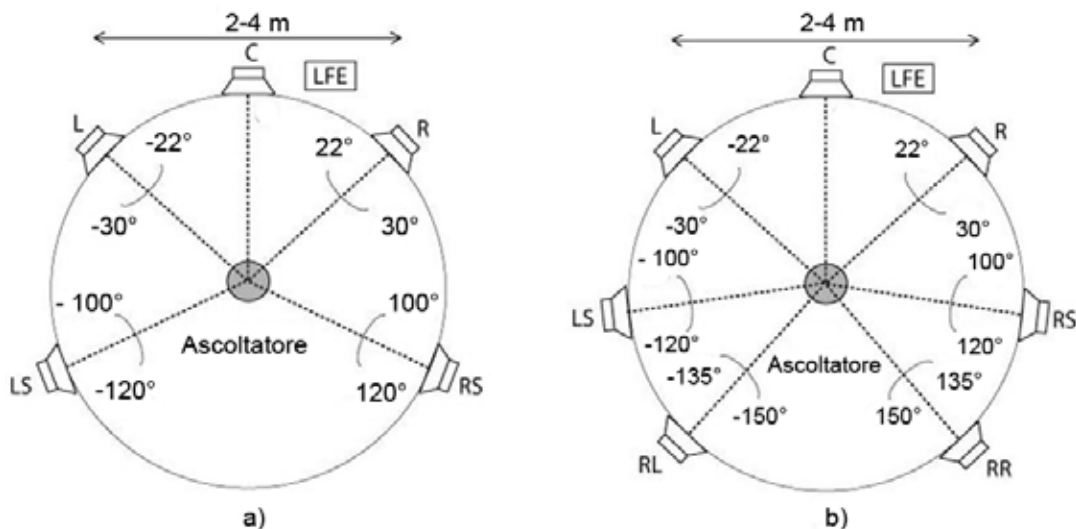



Fig. 8 - Orientamento delle casse nei sistemi 5.1 (a) e 7.1 (b).

1.4 Sistema di diffusione Ambisonics

Il sistema Ambisonic[Nota 6] consiste in una metodica di spazializzazione sonora, che comprende sia tecniche di ripresa e registrazione del suono che procedure di mixaggio e riproduzione. Si basa sulla creazione, nella zona di ascolto, di un campo sonoro il più possibile uguale a quello originale e in grado di riprodurre le stesse sensazioni psicoacustiche (ambiente, distanza, posizione e timbrica) che si ha ascoltando direttamente l'evento originale. Conoscendo infatti le informazioni relative alla pressione e alla velocità delle particelle d'aria in un determinato punto, è possibile ricostruire fedelmente il campo.

Le caratteristiche direzionali del campo acustico vengono ricostruite sommando le componenti armoniche sferiche del campo stesso, ognuna delle quali viene acquisita tramite un microfono con uguali caratteristiche di direttività.

Nota 6 - Non esiste una vera spiegazione del termine Ambisonic. Dal punto di vista etimologico si potrebbe pensare come l'unione dei termini latini ambo (ambipolare) e sonus (suono), facendo quindi pensare alla possibilità del sistema di basarsi sulla teorie legate alla psicoacustica e alla spazializzazione del suono. Tuttavia ambo può anche far pensare al termine inglese ambient (ambiente), rimandando nuovamente all'idea della ricreazione del campo sonoro. Sempre ambo può far riferimento ai due parametri su cui si fonda la teoria: pressione e velocità delle particelle d'aria.
Nota 7 - una possibile soluzione consiste nell'utilizzare più microfoni (minimo quattro) disposti nello stesso punto, posizionati al centro della scena acustica.

A questo scopo esistono diverse tecnologie di acquisizione del segnale, tra cui: le sonde microfoniche Soundfield, Tetramic e più recentemente anche la sonda VMS 3D.

Dalla teoria psicoacustica si ricava che per frequenze minori di 700 Hz il meccanismo dominante di localizzazione sonora è la differenza di fase tra i segnali alle due orecchie, mentre alle frequenze medio-alte (700 Hz ÷ 5 kHz) è dominante la loro differenza energetica. Le informazioni sulla spazialità del campo acustico sono codificate, in fase di ripresa, tramite i segnali corrispondenti alla pressione e alla velocità delle particelle d'aria nel punto in cui è posta la sonda acustica. Per una ricostruzione solamente bidimensionale sono necessari almeno tre altoparlanti, mentre una riproduzione tridimensionale ne richiede almeno quattro. Le configurazioni di ascolto possono essere di diverso tipo con, ad esempio, quattro altoparlanti disposti ai vertici di un quadrato centrato sulla posizione d'ascolto (per una resa bidimensionale), oppure otto sistemati ai vertici di un cubo (per una restituzione tridimensionale).

In linea teorica la posizione ottimale dell'ascoltatore non è ristretta ad un punto, ma risulta essere estesa a una determinata porzione di spazio.

PRO:

- ☺ semplice sistema di registrazione[Nota 7];
- ☺ indipendenza del sistema di codifica da quello di decodifica (riproduzione) con array di altoparlanti.

CONTRO:

- ☹ le sorgenti irradiano soltanto onde piane;
- ☹ gli altoparlanti devono essere sufficientemente lontani dall'ascoltatore (questo è un problema non trascurabile in ambienti di piccole dimensioni).

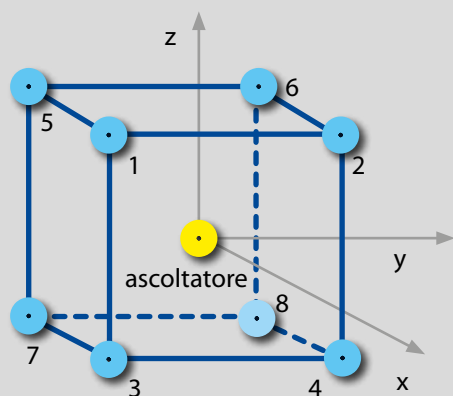



Fig. 9 - Configurazione minima per l'ascolto 3D.

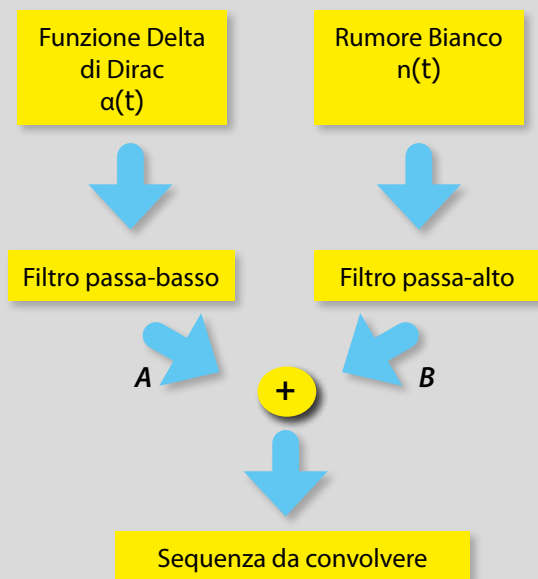



Fig. 10 - Schema della creazione dei segnali.

1.5 La restituzione Ambisonic

La restituzione del segnale codificato B-format viene effettuata eseguendo apposite operazioni algebriche dei canali W, X, Y e Z, che sono ricavate in base ai principi generali della teoria della localizzazione sonora per ciascuna configurazione di riascolto. Un esempio può essere sviluppato considerando un insieme di otto altoparlanti disposti ai vertici di un cubo e diretti verso l'ascoltatore posizionato al centro della struttura (figura 9).

Per questa configurazione le formule algebriche sono le seguenti:

$$Sgn1 = G_W \cdot W + G_X \cdot X + G_Y \cdot Y + G_Z \cdot Z$$

$$Sgn2 = G_W \cdot W + G_X \cdot X - G_Y \cdot Y + G_Z \cdot Z$$

$$Sgn3 = G_W \cdot W + G_X \cdot X + G_Y \cdot Y - G_Z \cdot Z$$

...

$$Sgn8 = G_W \cdot W - G_X \cdot X - G_Y \cdot Y - G_Z \cdot Z$$

dove G_w, G_x, G_y, G_z sono termini di guadagno introdotti per ottimizzare la resa del sistema. Nonostante l'uso di tali coefficienti, le immagini sonore prodotte appaiono inizialmente piuttosto instabili e la zona d'ascolto molto limitata nei pressi del centro del cubo.

Queste disomogeneità vengono attribuite ad interferenze e conseguenti cancellazioni in determinate porzioni della zona d'ascolto, dovute in gran parte alla parziale coerenza dei segnali provenienti dagli altoparlanti che sono sempre somme algebriche di W, X, Y e Z.

Per rimuovere questo inconveniente si è deciso di rendere casuali le fasi dei segnali che alimentano le casse, per far sì che, nella zona d'ascolto, l'energia risultante sia equivalente alla somma algebrica dei segnali. Questa operazione però riguarda solo lo spettro delle medie e alte frequenze (sopra i 700 Hz), poichè a frequenze inferiori è proprio la fase a stabilire la localizzazione e pertanto non deve essere alterata. Per garantire gli effetti desiderati vengono creati otto segnali differenti secondo lo schema in figura 10.

Ciascuno di questi segnali consiste nella somma degli altri due: il primo (***A***) contiene solo le frequenze inferiori a 700 Hz, mentre il secondo (***B***) contiene solo le frequenze maggiori. In particolare, il segnale

B si ottiene filtrando con un filtro passa-alto un breve segmento di rumore bianco e possiede, in virtù delle proprietà del rumore bianco, valori di fase casuali. Il segnale ***A***, invece, si ottiene filtrando con un filtro passa-basso una funzione impulsiva (la delta di Dirac) e ha fase costante sotto i 700 Hz. Ciascuno degli otto segnali ottenuti viene convoluto con una delle tracce di restituzione e questo comporta un significativo aumento della focalizzazione e localizzazione delle immagini sonore, lasciando inalterata la zone utile d'ascolto.

1.5.1 Posizionamento degli altoparlanti

Uno dei maggiori vantaggi dell'Ambisonic consiste nel fatto che la parte di codifica è assolutamente indipendente dalla fase di ripresa; questo consente quindi una grande libertà di scelta sul numero di altoparlanti da utilizzare. Gli effetti che possono variare aumentando o diminuendo il numero di altoparlanti sono principalmente due: il senso di immersione nella scena sonora (che aumenta quanto più è fedele e precisa la registrazione) e l'ampiezza dell'area d'ascolto (l'uso di molti altoparlanti garantisce un ascolto più realistico dovuto all'impressione di avere un'unica sorgente distribuita spazialmente). Questi due parametri sono fondamentali per un sistema come Ambisonic, il quale ha come obiettivo la ricreazione tridimensionale della scena sonora. Come detto il numero di altoparlanti varia molto in funzione del tipo di resa sonora che si vuole ottenere e soprattutto alle dimensioni della stanza in cui effettuare la riproduzione. Questo ultimo punto rappresenta un elemento molto importante soprattutto quando si considerano stanze di piccole dimensioni e quindi quando è necessario valutare attentamente il comportamento acustico dell'ambiente in termini di riflessioni e risonanze. Per una buona resa gli altoparlanti devono essere collocati a distanza adeguata dalla posizione in cui si trova l'ascoltatore (circa 2 m).

Nel caso si voglia ottenere un effetto 2D il numero minimo di altoparlanti è quattro, mentre nel caso si voglia un effetto 3D il numero minimo di altoparlanti è otto, considerando l'ascoltatore al centro di un cubo con gli altoparlanti posizionati in prossimità degli otto vertici (figura 11). Risulta inoltre molto vantaggioso agganciare (e non fissare) gli altoparlanti al muro, soprattutto in situazioni sperimentali in cui è necessario modificare in tempo reale la configurazione della stanza per effettuare misurazioni e test.

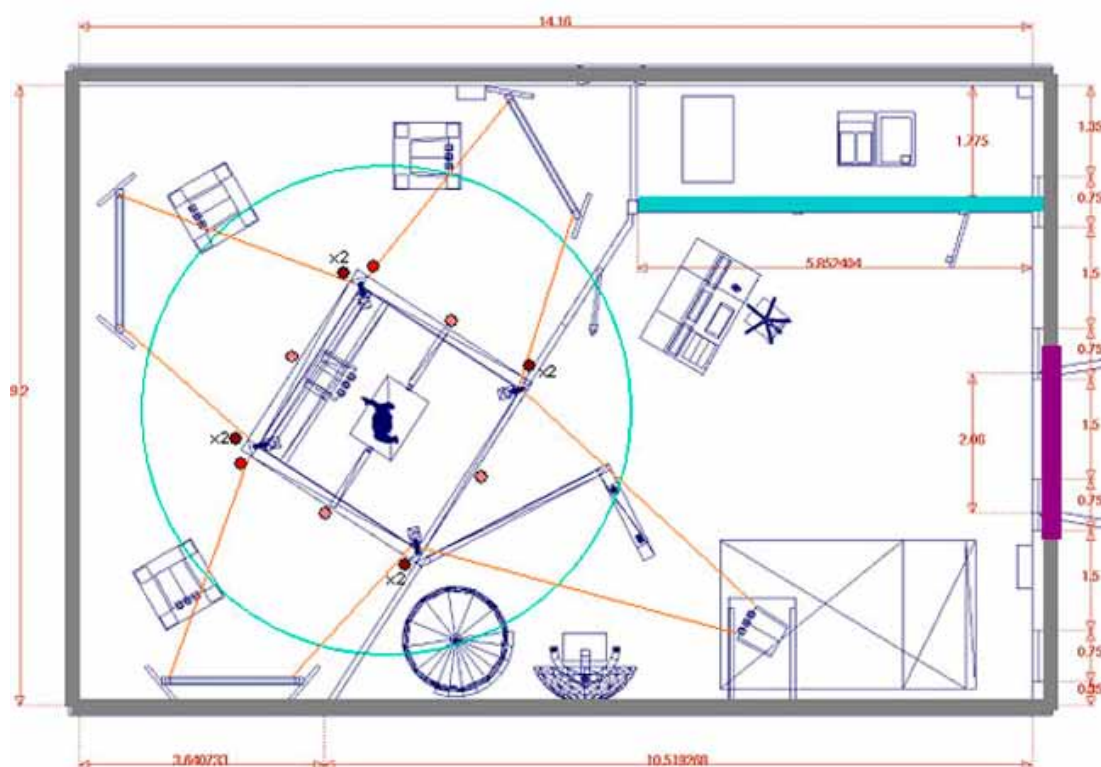



Fig. 11 - Possibile configurazione.

1.6 L'olofonia

L'olofonia è una tecnica di registrazione e riproduzione sonora eseguita tramite un microfono, olofonico, il quale permette di riprodurre un suono in modo molto fedele rispetto all'originale. In fase di riproduzione il suono viene percepito nelle esatte coordinate spaziali di registrazione. In questo modo è possibile localizzare la provenienza di un suono in tutto lo spazio tridimensionale in modo accurato.

La ripresa viene effettuata tramite un microfono olofonico[Nota 8] il quale è formato da sette capsule localizzate esternamente sul perimetro del supporto (la testa) più una capsula interna in grado di catturare le basse frequenze, ottenendo sistemi 5.1, 6.1 o 7.1.

In uscita un Holophone ha otto cavi bilanciati organizzati come in tabella:

Canale	*Microfono*
1	Left
2	Right
3	Center
4	LFE
5	Left Surround
6	Right Surround
7	Top
8	Center Rear

Bisogna fare attenzione a distinguere un sistema surround da un sistema olofonico: un sistema surround non è in grado di far giungere all'ascoltatore i suoni provenienti da qualsiasi punto dello spazio tridimensionale, cosa che invece un sistema olofonico riesce a fare.

È da notare, tuttavia, come in commercio sia ancora difficile trovare casse acustiche in grado di riprodurre in modo fedele l'olofonia (solo ultimamente si stanno diffondendo), perciò l'ascolto si può fare quasi esclusivamente tramite l'utilizzo di cuffie.

2. Casi di studio

2.1 Auditorium Rai - Torino

L'Auditorium Rai (figura 12) rappresenta uno dei luoghi di riferimento di Torino per quanto riguarda la riproduzione della musica sinfonica, e non solo, grazie sia al contributo dell'Orchestra Sinfonica Nazionale della Rai, ma anche grazie alla qualità dell'ascolto che è possibile percepire all'interno della sala.

Durante la ripresa audio/video delle prove generali di un concerto di musica sinfonica, tenutasi il 13 maggio 2010 presso l'Auditorium, è stato possibile osservare la struttura interna e valutare realmente la qualità dell'ascolto. Come si può notare dall'immagine di figura 13 il palco è diviso in due parti sfasate in altezza. Nella parte inferiore è presente l'orchestra, mentre in quella superiore viene collocato, a seconda delle occasioni, il coro. Questa disposizione non è casuale, infatti, collocare nella parte superiore il coro permette di fare in modo che il suono pro-

Nota 8 - il microfono considerato è l'H2 PRO della Holophone.

Fig. 12 - Auditorium Rai - Torino.

Fig. 13 - Ripresa senza coro.

dotto dall'insieme degli strumenti non mascheri quello del coro. Da notare è la disposizione di una serie di diffusori in legno collocata posteriormente all'orchestra che permette di aumentare la diffusione del suono nell'ambiente senza disturbare la percezione del suono per i musicisti.

Inoltre, sopra il palco, appesi al soffitto, sono stati posizionati sedici diffusori arcuati, disposti in due file da sei e una da quattro (figura 14). Questa disposizione ha una duplice funzione:

- dividere lo spazio tra il pavimento e il soffitto in modo da evitare l'effetto eco, che, come detto, si crea se c'è uno spazio maggiore di 17 m;
- permettere la diffusione omogenea del suono verso il pubblico posto nelle balconate e al fondo della sala.

Per quanto riguarda la scelta dei materiali per la progettazione acustica, sono stati utilizzati materiali in grado di favorire al massimo la diffusione, cercando di evitare, soprattutto sul palco, un alto assorbimento del suono. Per le sale da concerto è necessario ottenere una certa quantità di risonanza, che ovviamente varia a seconda del genere musicale. Sul palco sono stati, quindi scelti materiali come il legno, per il pavimento e la parete retrostante l'orchestra, e l'intonaco per i muri perimetrali dell'intero Auditorium.

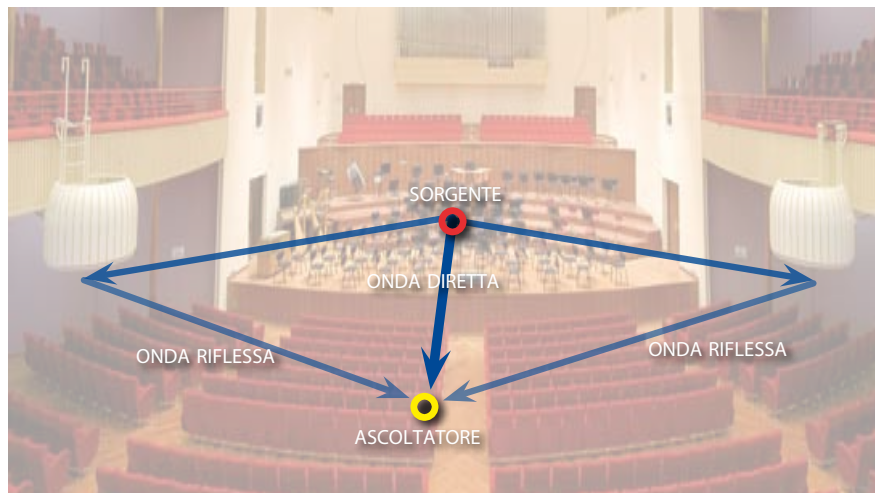



Fig. 15 - Riflessioni centrali

Per la platea e balconate sono stati utilizzati materiali come il velluto sulle poltrone, che permette di assorbire in quantità adeguata il suono prodotto. Infatti, nella progettazione acustica e nella scelta del tipo di materiali per ambienti di questo tipo, risulta fondamentale considerare il tempo di riverberazione "a vuoto" della sala, ma anche con il pubblico all'interno, in quanto ogni persona contribuisce ad aumentare l'assorbimento acustico totale della sala.

Per valutare la qualità dell'ascolto durante la riproduzione dei brani musicali è stato utile spostarsi in due punti precisi della platea: al centro e a lato.

Come è facile prevedere, il punto in cui la qualità dell'ascolto risulta migliore è al centro, in quanto il ritardo tra l'onda diretta e le riflessioni laterali (che arrivano in contemporanea e con lo stesso valore di attenuazione) è minimo (figura 15).

Fig. 14 - Diffusori sospesi.

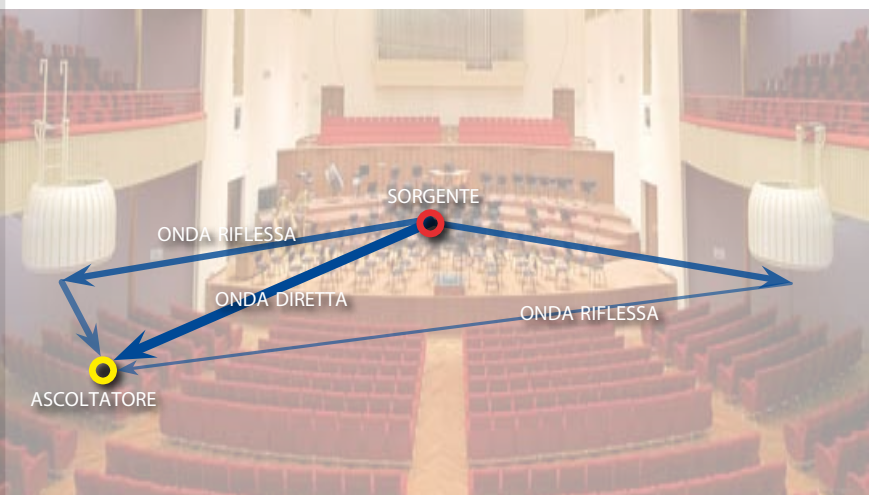



Fig. 16 - Riflessioni laterali

L'onda che viene riflessa dalla parete più lontana deve compiere un percorso nettamente più lungo di quella riflessa dalla parete opposta, oltre al fatto che viene attenuata quasi completamente prima di arrivare al punto di ascolto (soprattutto nel caso in cui la sala sia piena).

Lateralmente, invece, la sensazione acustica varia leggermente e il suono appare più cupo. Questo fondamentalmente per il fatto che la fila laterale si trova sotto la balconata e vicino a dei pilastri; in questo modo l'energia dell'onda diretta si somma a quella dell'onda riflessa e diffratta alle basse frequenze, creando quindi un raddoppio dell'energia stessa, e provocando la sensazione di un suono più cupo (figura 16).

2.2 Casa della Suono – Parma

La Casa del Suono di Parma (figura 17) è un ambiente realizzato all'interno dell'ex chiesa di Santa Elisabetta con l'intento di essere sia museo, sia progetto multidisciplinare che la Casa della Musica dirige in collaborazione con l'Università di Parma. Al suo interno, oltre a contenere una collezione di strumenti di diffusione dagli anni '20 fino a oggi, offre la possibilità di effettuare delle prove di ascolto utilizzando sistemi di diffusione innovativi quali il lampadario sonoro e la sala bianca, allestita con un sistema di diffusione surround basato sulla Wave Field Synthesis (WFS)[Nota 9].

Il lampadario sonoro (figura 18) è un'installazione che permette di creare sorgenti virtuali in movimento sopra l'ascoltatore attraverso l'uso della Wave Field Synthesis, formata da 224 altoparlanti disposti in 64 gruppi alimentati da 64 canali audio. Il

Fig. 17 - Casa del suono.

Fig. 18 - Il lampadario sonoro.

sistema è gestito da un elaboratore centrale che usa un software creato ad hoc, da un'interfaccia audio che consente di utilizzare 64 canali audio digitali in uscita, 8 convertitori digitale/analogico da 8 canali ciascuno e da altrettanti amplificatori a 8 canali, per un totale di 64 canali analogici finali. Camminando al di sotto del lampadario è effettivamente possibile percepire l'ampiezza del cono sonoro e discriminare le varie sorgenti, ottenendo come effetto complessivo una buona sensazione di immersione nella scena sonora. É da notare come questa sensazione sia favorita dal fatto di posizionare gli altoparlanti con un angolo di curvatura tale da fare in modo che il punto di intersezione delle onde si crei al di sopra della testa dell'ascoltatore, ponendo l'ascoltatore stesso completamente all'interno del cono sonoro.

La sala bianca, (figura 19) è un ambiente che ospita un sistema surround avanzato basato anch'esso sulla Wave Field Synthesis e gestito da un software apposito per questa applicazione. Questo sistema permette di ricreare un campo sonoro sfruttando un anello di 189 altoparlanti full-range disposti lungo il perimetro della stanza a 1.50 m di altezza.

Dagli ascolti effettuati all'interno si è potuto verificare come sia possibile ricreare una sensazione di campo tridimensionale, pur avendo sorgenti registrate in modo statico. Questa sensazione viene ricreata anche grazie alla funzionalità offerta dal software di simulare le sorgenti a diverse distanze dal punto di ascolto, che in questo caso è la sala stessa. La figura 20 corrisponde alla rappresentazione offerta dal sofware di simulazione: il rettangolo centrale è la stanza e le circonferenze simulano lo spazio di ascolto nell'ipotesi di uno spazio aperto. Le sorgenti sonore virtuali sono allocate in modo tale che movimento della sorgenti, loro intensità e distanza dall'osservatore simuli le condizioni di ascolto tridimensionale. L'effetto può essere estramente realistico: la registrazione dell'abbaiare di un cane fermo in una posizione, ad esempio, può dare origine alla sensazione, da parte di un ascoltatore, di essere circondato da un intero branco di cani.

In questo modo l'unione di elementi come la distanza delle sorgenti, il loro movimento e la loro altezza permettono di creare la sensazione di profondità del campo sonoro nell'ascoltatore.

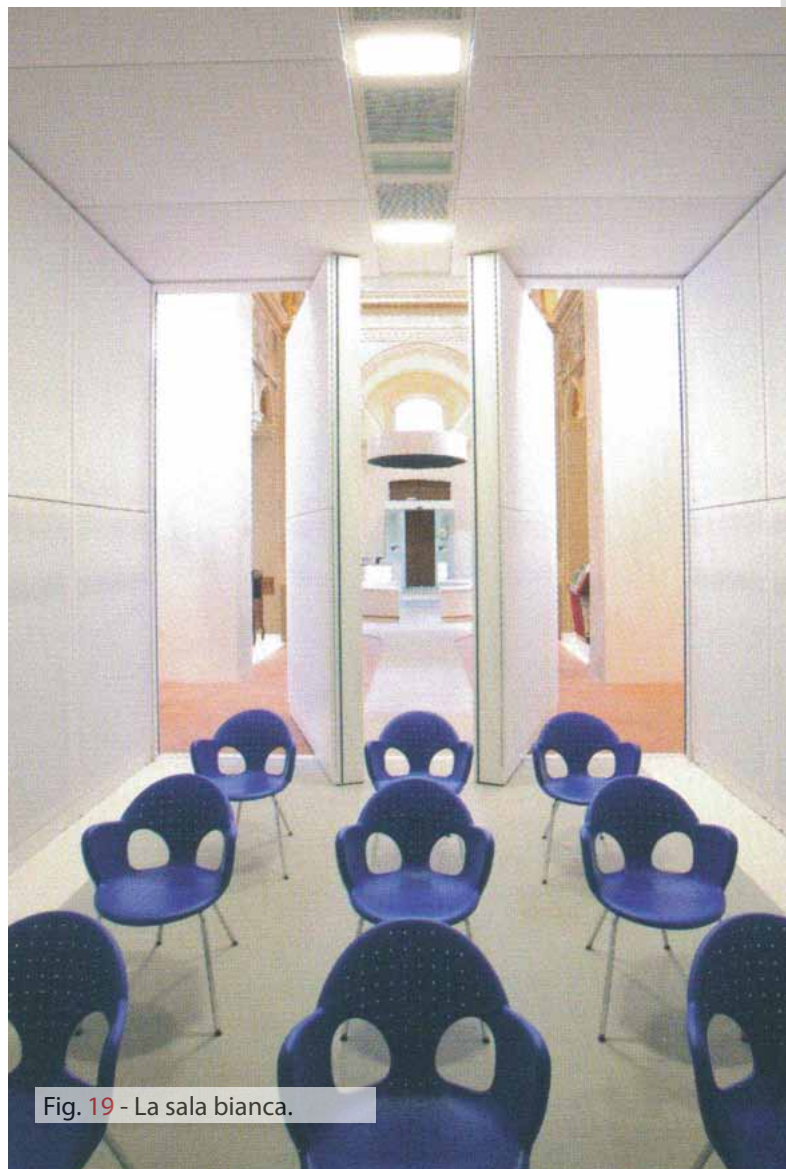
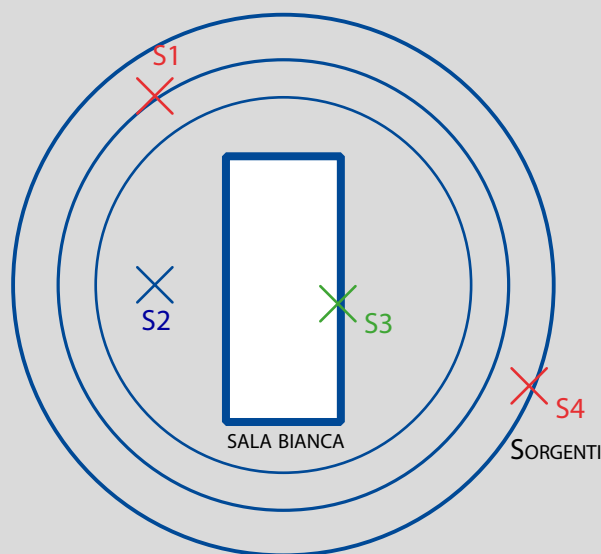



Fig. 19 - La sala bianca.

Fig. 20 - Gestione delle sorgenti virtuali via software.

Grazie al software è inoltre possibile simulare il riverbero tipico di diversi tipi di ambiente. Ciò è possibile registrando con dei microfoni Ambisonic le componenti di pressione e velocità tipiche di alcuni ambienti e successivamente applicandole ai vari segnali sonori. Come prova è stato ascoltato un brano di musica sinfonica a cui, in tempo reale, sono stati applicati i riverberi di una stanza di piccole dimensioni, del Teatro Farnese e di una cattedrale.

Ringraziamenti

Si ringraziano in particolare l'Ing. Angelo Farina e l'Ing. Andrea Capra dell'Università degli Studi di Parma per le informazioni fornite in occasione della visita della Casa del Suono e per la gentile disponibilità.

4 Sistemi di diffusione sonora Gli altoparlanti

Testo e figure tratti dall'articolo di Leonardo Scopece e Alberto Ciprian pubblicato su Elettronica e Telecomunicazioni, Agosto 2010

1. Introduzione

Con le nuove tecniche di ripresa e con i nuovi sistemi di editing audio multicanale e surround, da un po' di anni è cambiato anche il modo di diffondere il segnale sonoro in ambienti di vario tipo: dalle sale per conferenza, che sono diventate ormai sale multimediali, a sale da concerto, alle chiese, ai cinema, agli ambienti domestici.

Sono anni ormai che l'utente si fornisce di sistemi di diffusione casalinghi, *home theatre*, composti normalmente di 5 casse acustiche con l'aggiunta di un sub-woofer (e molte volte dispone questi altoparlanti non dove devono essere disposti, ma dove "stanno bene" con l'arredo della stanza).

In questo capitolo si illustrano le caratteristiche tecniche e tecnologiche degli altoparlanti, in modo che si possa avere un ampio ventaglio di conoscenze sull'argomento.

2. Parametri e grandezze

2.1 Impedenza

L'impedenza rappresenta la grandezza elettrica assimilabile alla resistenza che complessivamente la bobina (*voice coil*) dell'altoparlante oppone al passaggio della corrente prodotta dall'amplificatore, quindi descrive la reazione elettrica dell'unità all'applicazione del segnale d'ingresso. Questa reazione dipende dalla frequenza del segnale applicato (nel caso di tono puro), oppure dalla frequenza di una certa componente (nel caso di segnale complesso). Conoscere questo parametro permette di rilevare, ad esempio, eventuali incompatibilità di funzionamento con elettroniche di amplificazione, oppure aiuta a scegliere il corretto schema di collegamento nel caso di utilizzo di più unità dello stesso tipo.

L'impedenza è una grandezza complessa, costituita da una parte reale, detta *resistenza*, e da una immaginaria, detta *reattanza*, la quale, a sua volta, è determinata da componenti induttive e capacitive variabili con la frequenza da riprodurre. Una diretta conseguenza dell'impedenza complessa consiste nello sfasamento tra la corrente entrante e la tensione applicata all'unità, che provoca fenomeni quali la *distorsione di fase*, e un funzionamento non ideale dell'amplificatore di potenza a cui l'unità è abbinata.

Sia il modulo dell'impedenza che l'argomento, sono variabili con la frequenza riprodotta e presentano solitamente un picco e un flesso in corrispondenza della frequenza di risonanza del sistema costituito da altoparlante e cassa (figura 1).

2.2 Risposta in frequenza

La risposta in frequenza corrisponde alla rappresentazione in forma grafica dell'andamento, al variare della frequenza, del livello di pressione sonora emesso dall'unità in un ambiente acusticamente adatto, a seguito dell'applicazione ai terminali dell'unità di un segnale sonoro di livello costante.

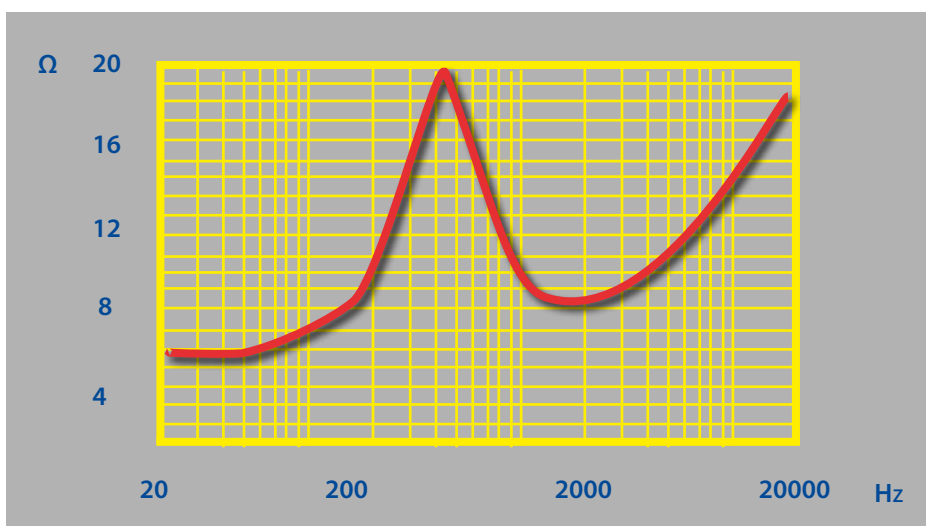



Fig. 1 - Andamento della curva di impedenza.

Una singola risposta in frequenza, tuttavia, non è sufficiente a descrivere in modo completo le prestazioni di una certa unità (indipendentemente dal fatto che si tratti di un'unità bassi, medi o alti). Infatti, la risposta in frequenza di una medesima unità varia più o meno sensibilmente a seconda della posizione di valutazione considerata, anche lasciando ogni altra condizione inalterata.

2.3 Sensibilità

La sensibilità può essere definita come il valore del livello del valore efficace della pressione sonora emessa da un'unità a seguito dell'applicazione ai suoi morsetti di un segnale sinusoidale con potenza pari a 1 W e a 1000 Hz.

Di norma, la sensibilità viene espressa in dB_{SPL} (*Sound Pressure Level*) utilizzando come livello di riferimento un valore di pressione sonora standard (20 µPa). La misura viene eseguita in camera anecoica o in campo libero alla distanza di un metro e ponendo lo strumento (normalmente il fonometro) in asse con l'altoparlante. La specifica del segnale è effettuata in termini di tensione e non di potenza conseguentemente al fatto che l'impedenza di un altoparlante non è costante ed è generalmente diversa dal valore nominale. Tuttavia, il dato di sensibilità si indica tenendo come riferimento la potenza di 1 W; in tal caso, infatti, si ritiene implicitamente che la tensione di ingresso abbia un valore efficace di 0,35 V_{pp}.

In genere, secondo le normative internazionali, la sensibilità di una certa unità deve essere rilevata in assenza totale di superfici riflettenti, cioè in condizioni anecoiche o di spazio libero. Il termine inglese più diffuso è *full-space loading*.

2.4 Distorsione

La distorsione è un elemento fondamentale per qualunque tipologia di unità specializzata (*sub-woofer*, *woofer*, *middle*, *tweeter*). Solitamente si dice che un'unità genera distorsione quando confrontando il contenuto del segnale da riprodurre con quello del segnale riprodotto, si notano delle alterazioni.

Le alterazioni possono essere prodotte dalla comparsa di componenti sonore di frequenze non presenti in origine, o anche dalla variazione dei livelli o delle relazioni di fase tra le componenti del segnale da riprodurre. All'origine di questi comportamenti ci sono solitamente fenomeni di non linearità.

In un sistema di altoparlanti si considerano due tipi di distorsione:

- la distorsione armonica totale (THD)
- la distorsione da intermodulazione (IMD)

La distorsione armonica di un segnale comporta l'introduzione di componenti sonore spurie, multipli interi della frequenza della componente del segnale originario. Le componenti spurie vengono definite *armoniche di distorsione*, e a ciascuna di esse viene associato un numero detto ordine, che è dettato dal valore del multiplo che la lega alla componente originaria.

La distorsione da intermodulazione, invece, deriva da un processo di interazione tra coppie di componenti, di frequenza differente, del segnale audio da tradurre in suono. Ogni componente spuria viene denominata prodotto di intermodulazione.

2.5 Frequenza di risonanza

Quando un sistema elastico viene sottoposto a una sollecitazione oscillatoria, reagisce diversamente a seconda della frequenza della sollecitazione. In particolare, il sistema elastico comincia a oscillare alla stessa frequenza della sollecitazione quando questa è simile alla frequenza di risonanza del sistema. Ogni sistema elastico, infatti, ha una propria frequenza di risonanza.

A questo punto, si può considerare un altoparlante come un sistema elastico, che quindi possiede una propria frequenza di risonanza (ad esempio 40 Hz). Applicando all'altoparlante un segnale elettrico sinusoidale e variando la frequenza del segnale, si nota che fino a quando la frequenza del segnale non si avvicina a quella di risonanza dell'altoparlante, la membrana non è sollecitata. Quando, invece, ci si avvicina ai 40 Hz, la membrana comincia a oscillare alla stessa frequenza ed è possibile udire un suono uscire dall'altoparlante di frequenza pari alla frequenza del segnale elettrico applicato.

2.6 Potenza acustica

La potenza rappresenta una grandezza particolarmente importante per quanto riguarda la classificazione commerciale degli altoparlanti. Per questo motivo è possibile distinguere quattro tipologie di potenza:

- **Potenza Media**: calcolata in basse alle letture RMS della tensione.
- **Potenza Musicale**: determinata tramite l'utilizzo di un segnale di prova sinusoidale. Tuttavia utilizzare solo questo dato per verificare la compatibilità di un sistema di altoparlanti con un certo amplificatore può portare a un sottodimensionamento del sistema stesso.
- **Potenza di Picco**: calcolata basandosi sui valori di picco del segnale applicato. Corrisponde a circa il doppio della potenza media.
- **Potenza Continua**: corrisponde alla potenza che l'unità può sopportare a un tempo indeterminato. Si riferisce al fatto che alcuni standard, come l'AES2, prevedono che il segnale venga applicato per intervalli di tempo determinati.

2.7 Tenuta in potenza

Da un punto di vista operativo, la tenuta in potenza, o *power handling*, è un parametro fondamentale, in quanto rappresenta la capacità di una determinata unità di funzionare senza danneggiarsi ai regimi di amplificazione richiesti.

La procedura che permette di definirla, e riconosciuta a livello internazionale è quella indicata dalla norma EIA (*Electronic Industries Alliance*) RS-426B, soggetta a revisione periodica, nella quale viene specificato l'uso di un segnale di rumore rosa[Nota 1] limitato nella banda 40 Hz ÷1 kHz. Questo segnale viene applicato all'altoparlante in aria libera, privo di cassa acustica, per almeno otto ore e al termine della prova l'altoparlante non deve presentare danni significativi.

2.8 Parametri di Thiele & Small

I parametri di Thiele e Small sono valori elettromeccanici che definiscono le prestazioni a bassa frequenza di un *driver*[Nota 2]. Normalmente vengono pubblicati sulle schede tecniche, in quanto permettono al progettista di simulare la posizione, la velocità e l'accelerazione del diaframma, oltre che l'impedenza di ingresso e uscita di un sistema composto da altoparlante e *cabinet*[Nota 3].

I parametri più importanti sono:

- f_s: è la *frequenza di risonanza* in aria libera dell'altoparlante, espressa in Hz. Le oscillazioni del cono sono massime, se opportunamente ecci-

Nota 1 - rumore rosa, in inglese *pink noise*, è caratterizzato da una densità spettrale di potenza inversamente proporzionale alla frequenza: ad ogni ottava corrisponde l'identica quantità di potenza di rumore.
Nota 2 - Il termine inglese *driver* è utilizzato per individuare un singolo trasduttore, mentre *loudspeaker*, cioè altoparlante, indica il sistema complessivo, che può essere costituito da uno o più driver.
Nota 3 - termine inglese per indicare la cassa, contenitore dell'altoparlante.

tato, a questa frequenza. Il valore si può ricavare tramite la seguente relazione:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{ms} \cdot M_{ms}}}$$

dove M_{ms} rappresenta la massa totale dell'altoparlante e C_{ms} la cedevolezza delle sospensioni.

- R_e: corrisponde al valore della *resistenza della bobina mobile* in corrente continua, misurabile con un preciso ohmetro, oppure rilevando il valore degli ohm dal modulo dell'impedenza a frequenza zero.
- R_{es}: è la *resistenza elettrica* dovuta agli attriti meccanici delle sospensioni dell'altoparlante.
- Q_{ms}: rappresenta il *fattore di merito meccanico* e si può calcolare tramite la relazione:

$$Q_{ms} = 2\pi \cdot f_s \cdot C_{ms} \cdot R_{es}$$

- Q_{es}: corrisponde al *fattore di merito elettrico* dell'altoparlante in aria libera, alla frequenza di risonanza:

$$Q_{es} = 2\pi \cdot f_s \cdot C_{ms} \cdot R_e$$

- Q_{ts}: è il *fattore di merito totale* dell'altoparlante in aria libera, alla frequenza di risonanza:

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} \cdot Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}}$$

- Z_{nom}: è l'*impedenza nominale*Nota 4. Rappresenta il valore di impedenza minima raggiunta nella curva caratteristica dell'altoparlante. Tale curva ha andamento irregolare: ha un picco in corrispondenza della frequenza di risonanza f_s, decresce progressivamente e quindi cresce di nuovo con l'aumentare della frequenza. Il valore di impedenza nominale è quello generalmente utilizzato per valutare il carico risultante ai morsetti dell'amplificatore a cui l'altoparlante verrà collegato.
- X_{nom}: corrisponde alla massima escursione lineare che il diaframma è in grado di compiere, senza riprodurre alcuna distorsione.

Nota 4 - solitamente 4, 8 o 16 Ω.

3. Tipologie tecnologiche di altoparlanti

3.1 Magnetodinamici

Gli altoparlanti magnetodinamici rappresentano la tipologia maggiormente utilizzata nei sistemi di diffusione sonora. Sono caratterizzati da un magnete permanente che genera un campo magnetico nel quale è immersa una bobina mobile direttamente collegata al cono dell'altoparlante; ad essa viene applicato un segnale elettrico, opportunamente amplificato, il quale la fa muovere permettendo al cono di comprimere l'aria circostante e quindi di produrre un'onda sonora.

Funzionamento

Il motore dell'altoparlante, come detto, è formato da un magnete permanente, da un circuito magnetico e da una bobina mobile. Nelle quasi totalità dei trasduttori moderni, il magnete è di forma toroidale ed è posto esternamente rispetto alla bobina mobile. In passato veniva utilizzato come materiale l'Alnico, una lega di alluminio, nichel e cobalto; tuttavia, a causa dell'elevato costo delle leghe metalliche, attualmente si utilizzano magneti ceramici, oppure magneti in neodimioNota 5.

Il circuito magnetico è costituito da due piastre e da un polo centrale di materiale metallico, con lo scopo di incanalare le linee di forza del campo magnetico e assicurare un'intensa induzione magnetica nel traferro.

La bobina mobile è avvolta su un supporto cilindrico di materiale leggero, rigido e resistente al calore; leggero perché è parte della massa mobile del trasduttore, rigido perché deve trasmettere la forza della bobina alla membrana senza deformarsi, resistente al calore perché è a diretto contatto con la bobina che si riscalda per effetto Joule.

Nota 5 - metallo appartenente al gruppo delle "terre rare", o lantanidi, presente nella lega chiamata *mischmetal* fino al 18%. Ha un aspetto argenteo e lucente, tuttavia, essendo uno dei lantanidi più reattivi, si ossida rapidamente all'aria coprendosi di una patina di ossido che, desquamandosi, espone all'azione ossidante dell'aria nuovi strati di metallo fresco..

La bobina è composta da un conduttore isolato avvolto sul supporto e saldamente fissato ad esso per mezzo di adesivi ad alte temperature. Può essere realizzata in filo, in rame o alluminio a seconda del peso e delle caratteristiche richieste. Per generare la forza costante al variare della sua posizione nel traferro, deve avere un prodotto ***B·l*** costante, dove ***B*** rappresenta il campo magnetico e ***l*** la lunghezza della bobina. Questo è effetto si può ottenere con due geometrie:

- **Overhung**: in questa configurazione l'altezza della bobina h_{bm} è maggiore di quella del traferro h_{pp}. É il sistema più utilizzato per altoparlanti dedicati alle basse frequenze, perché permette buone escursioni e fattori di forza senza richiedere grandi magneti. In questo caso la massima escursione geometrica X_{max} è data da:

$$\frac{(h_{bm} - h_{pp})}{2}$$

  Quindi, a parità di fattore di forza, grandi escursioni richiedono una bobina di altezza maggiore (a scapito della leggerezza).

- **Underhung**: in questo caso, invece, l'altezza del traferro h_{pp} è maggiore dell'altezza della bobina h_{bm}. É il sistema più utilizzato per altoparlanti destinati alla riproduzione delle alte frequenze, poiché non richiedono alte escursioni. In questo caso, il parametro X_{max} è dato da:

$$\frac{(h_{pp} - h_{bm})}{2}$$

  Il vantaggio di questa soluzione consiste nel consentire un rendimento elettroacustico più elevato dato che tutte le spire sono concatenate con il flusso magnetico, tuttavia, presenta anche lo svantaggio di dover utilizzare magneti di grandi dimensioni e quindi il costo per la sua realizzazione risulta più elevato.

3.2 Elettrostatici

Gli altoparlanti elettrostatici sono principalmente caratterizzati dalla possibilità di utilizzare un campo elettrico al posto di quello magnetico. Il funzionamento tipico di questi altoparlanti si basa su una proprietà caratteristica dei condensatori, cioè la variazione di capacità che si ottiene variando la distanza di due lamine. Applicando quindi una tensione di frequenza variabile ai capi dell'altoparlante, la lamina mobile inizia ad essere attratta in funzione del valore di tensione applicato. Questo dispositivo ha anche il vantaggio di fermare la tensione continua di polarizzazione, avendo un'impedenza molto elevata per i segnali che servono a pilotarlo.

Funzionamento

Dal punto di vista tecnico, gli altoparlanti elettrostatici sono formati da tre elementi fondamentali, due statori[Nota 6] e una membrana (figura 2).

La membrana si muove all'interno degli statori sotto l'azione di un campo elettrico generato dagli statori stessi: è necessario, quindi, che gli statori siano di materiale conduttivo e, affinché non ostacolino la fuoriuscita del suono verso l'esterno, devono presentare un'abbondante superficie aperta. Per questo motivo sono in genere realizzati con una lamiera forata o una rete. La membrana è composta da una pellicola di materiale ad alta resistività, elastico, leggero e robusto.

Nota 6 - in una macchina avente parti in movimento, lo statore è l'insieme delle parti fisse.

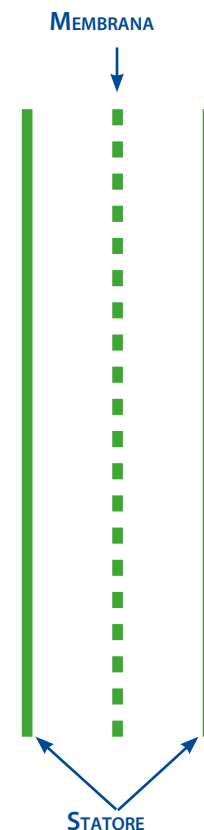



Fig. 2 - Componenti principali di altoparlante elettrostatico.

Per valutare i vantaggi dell'utilizzo di un pannello elettrostatico nei confronti di un altoparlante tradizionale è necessario analizzarne il funzionamento. Innanzitutto, considero un sistema formato da uno statore e una membrana (figura 3).

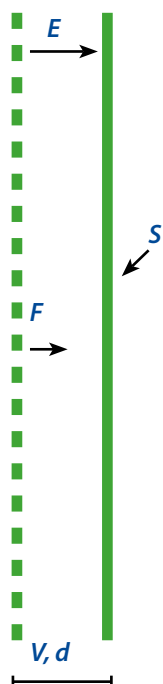



Fig. 3 - Statore e membrana.

dove:

- d è la distanza tra lo statore e la membrana
- S è l'area dello statore (e per ipotesi anche della membrana)
- V è la tensione applicata tra lo statore e la membrana
- q è la densità di carica presente sulla membrana
- F è la densità di forza applicata alla membrana
- E è il campo elettrico presente all'interno dello spazio tra statore e membrana

Lo statore e la membrana costituiscono quindi un condensatore a facce piane e parallele, la cui capacità è data dalla relazione:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d}$$

dove ε_0 corrisponde alla costante dielettrica nel vuoto.

All'interno di questo condensatore è presente un campo elettrico, la cui intensità è data dal rapporto fra la tensione applicata alle armature e la distanza fra le armature stesse:

$$E = \frac{V}{d}$$

Il legame tra la carica accumulata nel condensatore e la tensione fra le armature è:

$$Q = C \cdot V = \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d} \cdot V$$

Quindi la densità di carica su ciascuna armatura vale:

$$q = \frac{Q}{S} = \varepsilon_0 \cdot \frac{V}{d}$$

Infine, poiché il prodotto fra la carica e l'intensità del campo elettrico in cui è immersa determina l'intensità della forza applicata alla carica stessa, si ha che

$$F = q \cdot E = \varepsilon_0 \cdot (V/d)^2$$

q è la densità di carica sulla membrana e F è la densità di forza applicata alla membrana.

Quindi, la forza complessiva agente sulla membrana è data dal prodotto tra la densità di forza e la superficie complessiva della membrana:

$$F_{tot} = F \cdot S$$

Da queste considerazioni emerge un primo elemento importante: la forza che muove la membrana è applicata in modo uniforme su tutta la superficie della membrana stessa, quindi al crescere delle dimensioni aumenta anche la forza.

Tuttavia è da notare che una struttura formata da un pannello elementare, come quella appena descritta, non si può utilizzare in pratica a causa della deformazione della membrana a riposo. E' necessario infatti che la membrana a riposo si trovi in una posizione intermedia che le consenta il massimo spostamento senza però toccare l'armatura. Ma la posizione della membrana è connessa con il valore della tensione applicata, che dipende dall'elasticità della membrana e che, a sua volta, dipende da quanto viene tesa la pellicola in fase di costruzione.

Inoltre, va considerato il fatto che siccome il campo elettrico si sviluppa soltanto tra la membrana e lo statore, una variazione della distanza ne provoca una forte variazione, provocando un funzionamento non lineare e una forte distorsione del suono riprodotto.

Per questi motivi è necessaria una soluzione basata su un doppio statore. In questo modo, la membrana a riposo si mantiene nella posizione intermedia fra gli statori e la dipendenza del campo elettrico dalla posizione della membrana viene ridotta. Quindi, a riposo ai due statori deve essere applicata la stessa tensione di polarizzazione, e il segnale audio deve

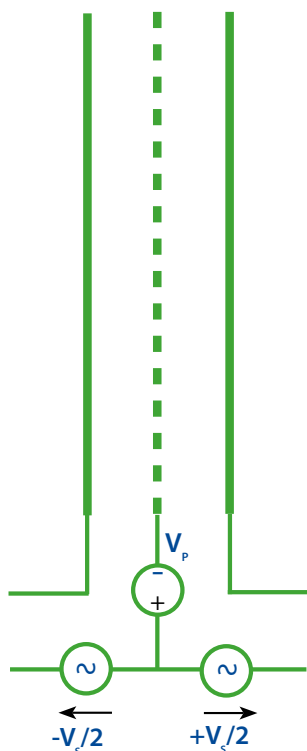



Fig. 4 - Tensioni applicate.

agire variando le tensioni sugli statori in quantità uguali e opposte.

Ripetendo l'analisi precedente si ottiene che la densità dei carica depositata sulla membrana vale:

$$q = 2\varepsilon_0 \cdot \frac{V_p}{d}$$

e la densità di forza applicata alla membrana vale:

$$F = q \cdot E_s = 2\varepsilon_0 \frac{V_p}{d} \cdot \frac{V_s}{d}$$

dove V_p è la tensione di polarizzazione e *Vs* è la tensione ''audio''. Queste due tensioni si possono applicare come nello schema di figura 4.

Infine, è da notare che la carica depositata sulla membrana non deve variare durante il movimento della membrana stessa, altrimenti si ottiene un comportamento non lineare a causa del fatto che il legame tra forza, carica e campo elettrico subisce grandi variazioni durante il passaggio da una posizione all'altra. Per questo motivo, la cosa migliore è che la membrana abbia una resistività elevata.

3.3 Piezoelettrici

Questo tipo di altoparlante sfrutta la proprietà di alcuni materiali di entrare in vibrazione quando vengono percorsi da corrente elettrica. La piezoelettricità viene quindi utilizzata per convertire il segnale elettrico in onde acustiche. La frequenza della vibrazione è correlata alla frequenza della corrente applicata e in questo modo viene riprodotto il suono trasportato dal segnale elettrico.

La struttura è rappresentata in figura 5.

Questi altoparlanti sono caratterizzati da un'elevata efficienza e impedenza. Per questo motivo, sono adatti per la realizzazione di matrici di altoparlanti composte da un elevato numero di elementi che, collegati in parallelo, offrono in blocco un'efficienza analoga a quella dei comuni altoparlanti elettrodinamici. Inoltre, gli altoparlanti piezoelettrici sono in grado di riprodurre frequenza molto elevate e per questo vengono impiegati soprattutto come tweeter.

Alcuni materiali piezoelettrici utilizzabili come "motore" di un altoparlante sono:

- Sale di Rochelle
- Titanato di Bario
- Zirconato di Piombo
- Film polimerici

4. Unità specializzate: gamma di frequenze dedicata

In un sistema di altoparlanti le unità specializzate rappresentano una parte fondamentale, in quanto sono in grado di fornire prestazioni soddisfacenti limitatamente alla riproduzione dei suoni appartenenti a una specifica gamma di frequenze.

Le unità specializzate si possono classificare in tre categorie:

- ***woofer***: specializzati nella riproduzione di suoni di bassa frequenza, dal limite inferiore della banda udibile (20 Hz) fino a frequenze di poche centinaia di hertz
- ***mid-range***: specializzati nella riproduzione di suoni di media frequenza, da qualche centinaia di hertz fino a un limite superiore di poche migliaia di hertz

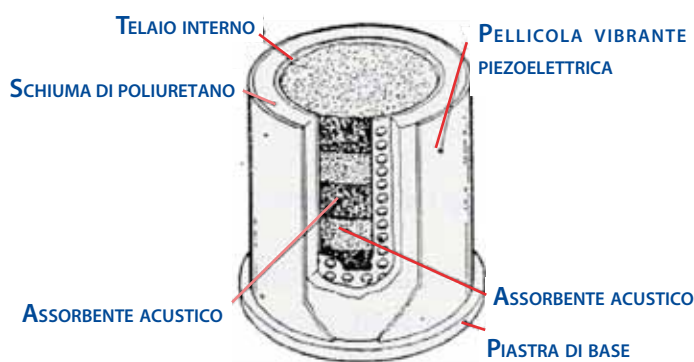



Fig. 5 - Struttura.

- ***tweeter***: specializzati nella riproduzione di suoni di alta frequenza, da poche migliaia di hertz fino al limite superiore della banda udibile (20 kHz)

Tuttavia, è da sottolineare che queste tre categorie possono essere estese per i componenti in grado di riprodurre suoni sotto i 20 Hz e sopra i 20 kHz; si aggiungono quindi anche i subwoofer e i super-tweeter.

4.1 Composizione delle unità specializzate

L'elemento centrale di ogni unità specializzata è l'altoparlante. Ogni altoparlante riceve in ingresso un segnale audio amplificato e il conseguente movimento del diaframma determina variazioni istantanee della pressione circostante, che l'orecchio percepisce come suono.

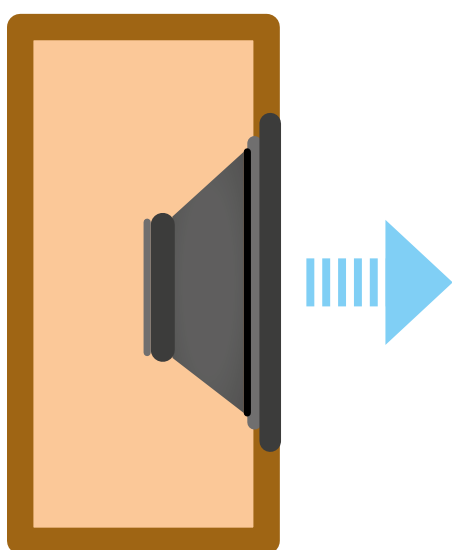



Fig. 6 - Struttura driver mobile a cassa chiusa.

Tutte le unità sono caratterizzate anche da un secondo elemento che non si può considerare come secondario: la cassa. Il suo ruolo è legato all'esigenza di ottenere risultati precisi in termini di risposta elettroacustica dell'unità specializzata. Ad esempio, in un'unità con altoparlante magnetodinamico montato in una cassa chiusa ermeticamente (figura 6), il mobile, che contiene all'interno materiale fibroso, ha la funzione di assorbire al meglio la radiazione posteriore del driver, al fine di prevenire il *cortocircuito acustico*[Nota 7]. Un'unità specializzata che prevede un simile abbinamento driver-cassa viene definita a sospensione pneumatica, o *closed box*.

Un altro possibile abbinamento driver-cassa prevede che la cassa non sia completamente chiusa e che, invece, presenti una o più aperture per il recupero in fase di una porzione di interesse della radiazione posteriore dell'altoparlante (figura 7).

Le due possibili configurazioni descritte fanno parte della categoria dei sistemi di trasduzione a *radiazione diretta*, poiché la membrana del driver si affaccia direttamente sull'ambiente da sonorizzare.

Nota 7 -fenomeno che provoca un drastico peggioramento delle prestazioni alle frequenze più basse.

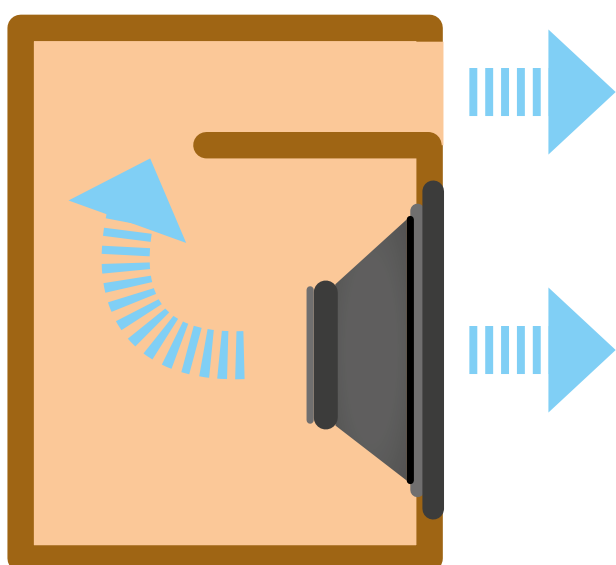



Fig. 7 - Struttura driver mobile a cassa aperta.

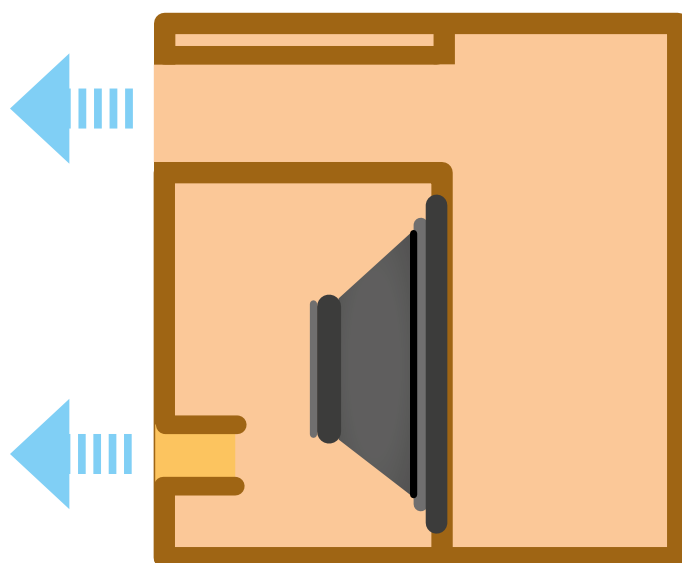



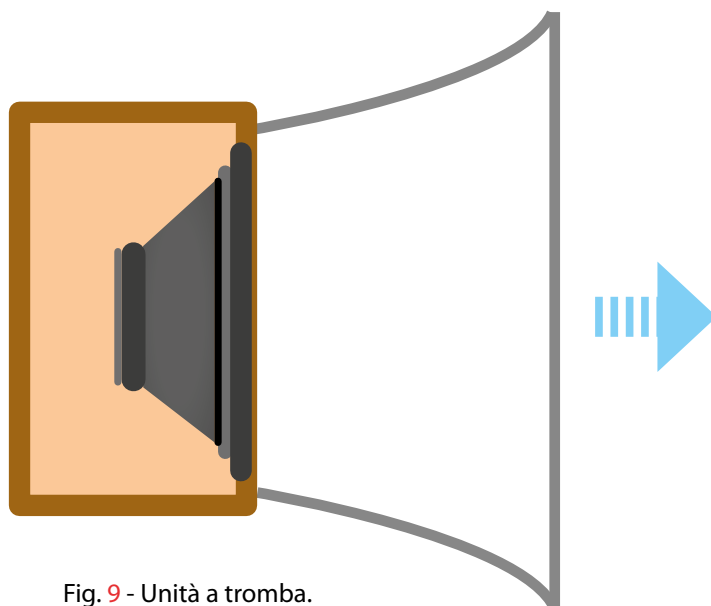
Fig. 8 - Unità in cassa passa-banda o a doppio carico reflex.

Da qui si deduce, quindi, che i sistemi a *radiazione indiretta* prevedono, invece, una sorta di anticamera tra altoparlante e ambiente da sonorizzare. Un esempio di questa categoria è l'unità bassi di tipo *passabanda* (figura 8), nella quale il woofer è montato internamente al mobile su una parete che delimita due camere che possono essere entrambe aperte ed eventualmente dotate di un "condotto di accordo"; in questo caso si parla di unità *a doppio carico reflex*.

Un altro esempio di sistema a radiazione indiretta è l'unità a tromba (figura 9), in cui la radiazione frontale del driver viene guidata verso l'ambiente da sonorizzare da un condotto a sezione crescente, detto tromba, mentre la radiazione posteriore arriva in un volume chiuso in modo da essere annullata.

Fig. 9 - Unità a tromba.

Un'unità specializzata può prevedere anche l'impiego di più driver dello stesso tipo e può contenere all'interno una rete di filtraggio passiva, costituita da induttori e condensatori, interposta tra altoparlanti e ingresso dell'unità specializzata. Le reti di filtraggio utilizzate sono:

- ***filtri passa-basso***: consentono il transito con una minima attenuazione dei componenti di segnale di frequenze inferiori alla frequenza di taglio
- ***filtri passa-alto***: consentono il transito con una minima attenuazione dei componenti di frequenza superiori alla frequenza di taglio
- ***filtri passa-banda***: consentono il transito con una minima attenuazione dei componenti di frequenza appartenenti a un certo intervallo di frequenze delimitato inferiormente dalla frequenza di taglio inferiore e superiormente dalla frequenza di taglio superiore

4.2 Il circuito di crossover

Il circuito di crossover rappresenta un componente necessario in sistemi che utilizzano vari tipi di unità a seconda della frequenza. Sono composti da filtri che hanno il compito di suddividere il segnale in ingresso in più segnali che coprono, ognuno, una banda di frequenza. Ad esempio, un circuito di crossover a tre vie (figura 10) genera tre segnali:

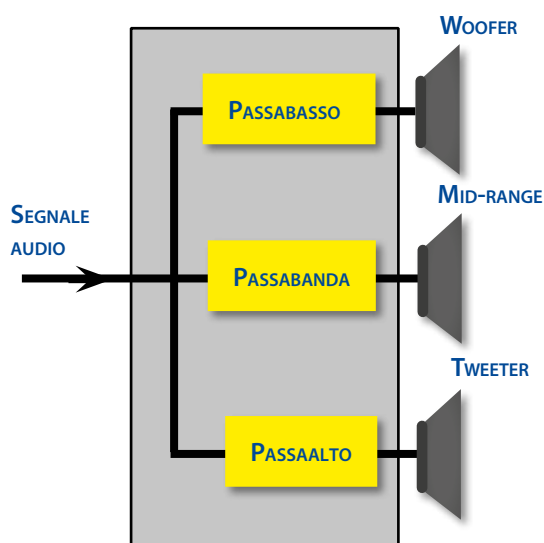



Fig. 10 - Crossover a tre vie.

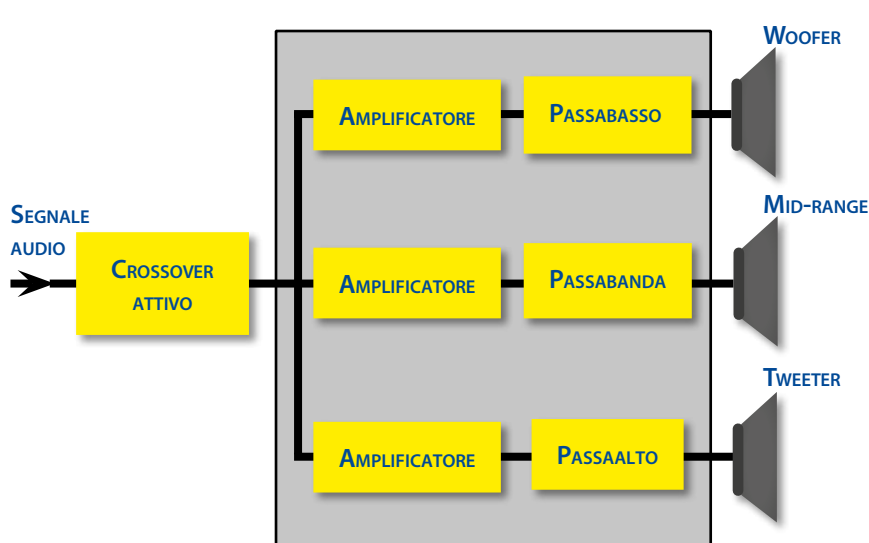
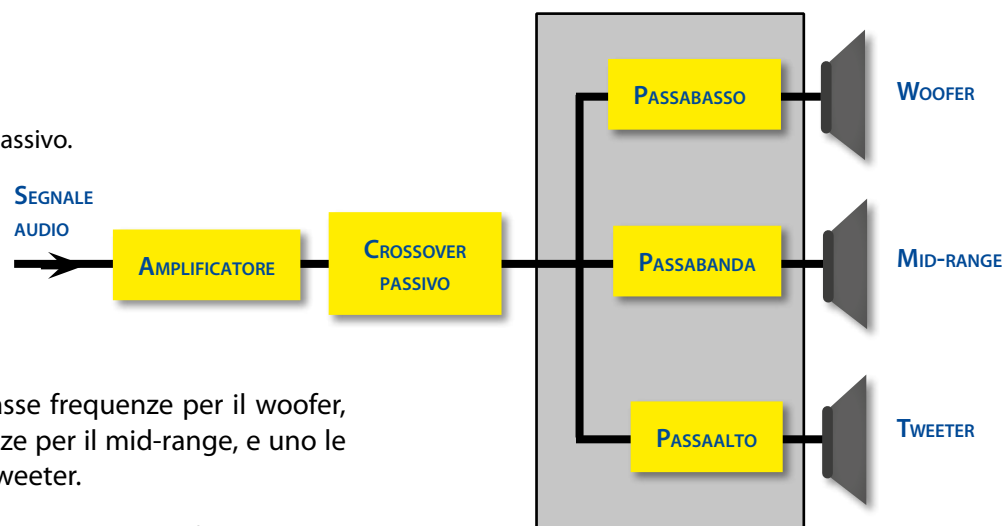



Fig. 11 - Crossover attivo.

Fig. 12 - Crossover passivo.

uno contenente le basse frequenze per il woofer, uno le medie frequenze per il mid-range, e uno le alte frequenze per il tweeter.

Un circuito di crossover si può classificare in due categorie:

- ***crossover attivo***: è costituito da un circuito attivo dotato di un'alimentazione autonoma e interviene sul segnale prima che questo venga amplificato. In questo modo, all'uscita si hanno tre segnali (nel caso di crossover a tre vie), ognuno dei quali con la propria composizione in banda, che verranno successivamente amplificati separatamente (figura 11).
- ***crossover passivo***: in questo caso il segnale arriva al crossover dopo essere stato amplificato (figura 12). Usando un solo amplificatore, il crossover non ha la necessità di essere alimentato. Questa soluzione è la più economica, ma presenta lo svantaggio di offrire una qualità minore in quanto presuppone l'uso di un solo amplificatore per l'intera banda dello spettro udibile e, quindi, anche un'amplificazione approssimativa del segnale.

Fig. 13 - Woofer.

5. Unità per la gamma di frequenza bassa

L'unità bassi è un sistema elettroacustico specializzato nella riproduzione di suoni di bassa frequenza nell'ambito di un intervallo compreso da un limite inferiore di 20÷50 Hz fino a un limite superiore di poche centinaia di hertz, e può essere costituito da uno o più altoparlanti accoppiati posteriormente a un volume aperto o chiuso, con una struttura a radiazione diretta o indiretta.

A causa della particolare collocazione in frequenza, in relazione alle caratteristiche percettive del sistema uditivo, a queste unità è richiesto di produrre elevate pressioni sonore per poter avere un livello di ascolto in linea con quello delle unità destinate alle medie e alte frequenze, alle quali ne bastano di meno.

5.1 Woofer

Un woofer (figura 13) è un tipo di altoparlante destinato alla riproduzione delle basse frequenze, tipicamente tra 40 Hz e pochi kHz. Solitamente la struttura corrisponde a quella di un driver elettrodinamico, con la caratteristica principale di avere peso e dimensioni superiori alle altre tipologie di altoparlante.

Dal punto di vista tecnico, la struttura interna è costituita da un cono di diametro sufficientemente largo, da una bobina in filo di rame e da un grande magnete in grado di fornire il flusso magnetico necessario per gli spostamenti assiali della bobina solidale al cono.

Il cono può essere realizzato con diverse tipologie di materiale, come: carta, resine plastiche o leghe metalliche.

5.2 Subwoofer

Il subwoofer (figura 14) è il componente destinato alla riproduzione dei suoni a bassissima frequenza, appartenenti cioè a una gamma di frequenze compresa tra 20 Hz e 200 Hz. A causa della gamma di frequenze limitata, la maggior parte dei subwoofer viene usata per aumentare la produzione degli altoparlanti che coprono le bande di frequenza più alte.

A livello tecnico, i subwoofer, utilizzano coni di 10-12 pollici di diametro e la necessità di queste dimensioni deriva dal fatto che le basse frequenze implicano un grande spostamento d'aria. L'alimentazione arriva tramite un amplificatore e la frequenza a loro dedicata viene tagliata dal circuito di crossover che assicura il fatto che le medie e le alte frequenze non arrivino al subwoofer stesso.

Fig. 14 - Subwoofer.

6. Unità per la gamma di frequenza medio-alta

L'unità per la riproduzione della gamma di frequenza medio-alta è un sistema elettroacustico specializzato nella riproduzione di suoni di frequenza nell'intervallo compreso da un limite qualche centinaia di hertz fino al limite superiore della banda dell'udito che corrisponde a 20 kHz. Un'unità di questa categoria è comunemente formata da almeno una coppia di altoparlanti: uno destinato alla riproduzione della gamma media, il mid-range, e uno destinato alla riproduzione della gamma acuta, il tweeter.

6.1 Mid-range

I mid-range (figura 15) sono i componenti in grado di riprodurre una gamma di frequenze compresa tra 300 Hz e 8 kHz (intervallo in cui è compresa la voce umana), e si presentano generalmente con struttura a cono o cupola.

I materiali più utilizzati per la realizzazione sono, ad esempio, il tessuto Kevlar, le fibre di carbonio e le leghe di metalli leggeri a base di alluminio, magnesio e titanio. La superficie radiante di un mid-range a cupola è, in genere, una sezione di 90 gradi di una sfera, realizzata in metallo o film plastico, con la sospensione e la co-bobina situata sul bordo esterno della cupola.

Fig. 15 - Mid-range.

6.2 Tweeter

Il tweeter è un componente dedicato alla riproduzione delle alte frequenze, solitamente dai 5÷8 kHz ai 20 kHz (alcuni sono in grado di arrivare fino a 45 kHz).

Dal punto di vista tecnico sono dispositivi elettrodinamici formati da una bobina sospesa in un campo magnetico. Elettrificando la bobina è possibile generare un campo magnetico variabile, che lavora in opposizione al campo magnetico fisso, costringendo la bobina e il diaframma ad essa collegato a muoversi. Siccome la bobina e il diaframma sono

collegati insieme, i movimenti producono movimenti d'aria che permettono di riprodurre i suoni acuti.

I tweeter moderni si differenziano abbastanza rispetto alle versioni precedenti, le quali erano di solito piccole versioni di woofer, e ovviamente anche i componenti interni si sono sviluppati notevolmente. Ad esempio i diaframmi di molti tweeter a cupola sono termoforati da film di poliestere impregnati con una resina polimerica.

Per quanto riguarda i materiali, vengono maggiormente utilizzati l'alluminio, il titanio, il magnesio e il berillio, essendo leggeri e rigidi, ma con basso smorzamento. Inoltre presentano una risonanza sopra i 20 kHz. Talvolta, vengono utilizzato materiali meno diffusi come, ad esempio, il diamante sintetico, avendo un'estrema rigidezza, ma anche fogli di polietilene e tessuti di seta.

Esistono diverse tipologie di tweeter, di seguito vengono descritte le principali.

Fig. 16 - Tweeter a cupola.

Tweeter a cupola

I tweeter a cupola (figura 16) sono realizzati collegando una bobina a una cupola, realizzata con un metallo sottile, agganciata ad un magnete e presentano una piastra frontale. Normalmente vengono classificati in base al diametro della bobina, che varia tra 19 mm e 38 mm (la tipologia più diffusa misura 25 mm).

Fig. 17 - Tweeter a cono.

Tweeter a cono

La struttura di questo tipo di tweeter è molto simile a quella di un woofer, ma ottimizzata per lavorare alle alte frequenze (figura 17). Le caratteristiche principali consistono in un cono piccolo e leggero, in modo da potersi muovere velocemente, e in sospensioni più rigide, in quanto per riprodurre le alte frequenze è necessaria una rigidità maggiore. I materiali utilizzati sono abbastanza rigidi (come la ceramica) e presentato uno smorzamento buono.

Fig. 18 - Tweeter piezoelettrico.

Tweeter piezoelettrico

Questa tipologia di tweeter (figura 18) è caratterizzata dal fatto di contenere un cristallo piezoelettrico accoppiato a un diaframma meccanico. Se si applica un segnale audio al cristallo, questo risponde flet-

tendosi in modo proporzionale alla tensione applicata alle superfici del cristallo. L'elemento attivo è il cuore del trasduttore, in quanto serve a convertire l'energia elettrica in energia acustica, ed è costituito da un materiale polarizzato, con elettrodi collegati a due delle facce opposte. Applicando un campo elettrico, le molecole polarizzate si allineano con esso, con la conseguente induzione dei dipoli all'interno della struttura molecolare, o cristallina, del materiale. Inoltre, viene aggiunto un materiale permanentemente polarizzato, come il titanato di Bario (BaTiO3), che produce un campo elettrico quando cambiano le dimensioni del materiale a seguito di una forza meccanica. Questo è quello che viene definito effetto piezoelettrico.

Tweeter a nastro

I tweeter a nastro (figura 19) utilizzano una membrana sottile (come l'alluminio), che supporta una bobina planare sospesa in un campo magnetico per riprodurre le alte frequenze. Il nastro è composto di materiale molto leggero e quindi capace di accelerazioni molto forti e di una risposta in frequenza elevata. I nastri solitamente non hanno un grande rendimento, tuttavia le versioni di tweeter con potenza elevata stanno diventando comuni in sistemi di amplificazione con struttura *line-array*.

Tweeter a tromba

Questi tweeter (figura 20) sono realizzati utilizzando una delle tipologie di tweeter precedentemente illustrata agganciata a una struttura a tromba. Quest'ultima permette, infatti, di controllare la dispersione e aumentare l'efficienza. Più è grande la tromba e minore è la frequenza con cui si può lavorare.

Plasma Tweeter

Il tweeter al plasma invece di impiegare una membrana mobile (come i classici altoparlanti), diffonde delle onde di pressione generando un plasma mediante una scarica che attraversa l'aria. Il plasma generato dalla scarica è composto da ioni ed è caratterizzato da una massa e una densità diversa da quella dell'aria fredda che circonda la scarica: modulando le dimensioni della scarica, si ottiene lo spostamento del fronte fra aria fredda e plasma. In virtù della differenza di densità, lo spostamento del confine aria-plasma provoca uno spostamento della stessa aria e, di conseguenza, si originano le onde di pressione responsabili della diffusione del suono.

Questo è il tweeter dalla tipologia più complessa e offre il vantaggio di realizzare un diaframma molto sensibile al segnale d'ingresso. Tuttavia presenta due svantaggi: ha un rendimento piuttosto basso nel caso in cui non venga accoppiato a una tromba e produce ozono, che è un gas tossico.

6.3 Super Tweeter

Il super-tweeter è il componente dedicato alla riproduzione delle frequenze superiori alla gamma di frequenze riprodotte da un normale tweeter. Viene utilizzato per ricreare un campo sonoro realistico, integrando il suono del tweeter e riproducendo le frequenze che il tweeter può riprodurre soltanto con una forte distorsione.

Un Super-Tweeter è generalmente destinato a rispondere bene alle frequenze fino ai 20 kHz, che rappresentano il limite superiore della gamma di frequenze percepite dall'orecchio umano, arrivando fino a 100 kHz.

Fig. 19 - Tweeter a nastro.

Fig. 20 - Tweeter a tromba.

7. Altoparlanti per applicazioni particolari

Spesso capita di trovarsi in situazioni in cui è richiesta una particolare tipologia di diffusione sonora legata a standard specifici o più semplicemente alla volontà di ottenere risultati soddisfacenti in termini di copertura, pressione sonora e di emissione in direzioni desiderate. Per questi motivi, esistono sul mercato altoparlanti specifici per la quasi totalità delle applicazioni.

7.1 Cinema

La realizzazione dell'impianto di diffusione acustica nelle sale cinematografiche è regolata dalla normativa ISO-SMPTE 2969, che prevede l'utilizzo di tre diverse unità di altoparlanti: un'unità full-range a due/tre vie per i canali retroschermo, un subwoofer per la riproduzione delle basse frequenze e un'unità full-range a una/due vie per l'effetto surround.

La prima unità è realizzata accoppiando un'unità di medio-bassi a radiazione diretta con un'unità a tromba (figura 21). Solitamente viene posizionata molto vicino a un pannello collocato dietro lo schermo, in modo da confinare l'emissione lungo una sola direzione.

Per quanto riguarda il subwoofer, il suo compito consiste nella riproduzione degli effetti a bassa frequenza, arrivando, in termini di banda passante, fino a 120 Hz e riproducendo le frequenze al limite della gamma audio con un adeguato livello di pressione sonora.

Fig. 21- Unità retroschermo a tre vie.

Per quanto riguarda le unità full-range dedicate al surround, bisogna evidenziare il fatto che nei normali sistemi surround analogici[Nota 8] il segnale è inviato al canale surround a banda ristretta fino a 7 kHz, mentre in quelli digitali[Nota 9] la gamma del canale surround è intera, quindi le unità altoparlanti per il surround sono realizzate utilizzando un sistema a due vie a radiazione diretta anche per il tweeter, che solitamente è a cupola.

7.2 Studi e regie

Le unità altoparlanti utilizzate negli studi di registrazione e nelle regie audio, dette monitor, si distinguono dalle altre tipologie grazie alla caratteristica di avere una risposta in frequenza costante su tutta l'estensione della gamma audio e avere una bassa distorsione, anche in presenza di livelli alti di pressione sonora.

Dal punto di vista costruttivo, i monitor sono caratterizzati dalla possibilità di includere l'amplificazione. Vengono, quindi, definite "unità attive". Inoltre, il fatto di avere l'amplificazione interna, garantisce anche un'ottimizzazione del rendimento energetico del sistema consentendo il raggiungimento di pressioni sonore elevate.

7.3 Grandi sonorizzazioni

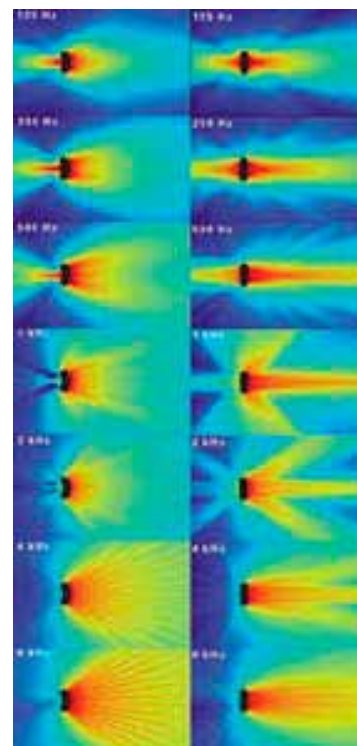
Il trattamento acustico dei grandi ambienti, come palazzetti o aree outdoor, necessita di una strumentazione particolare e soprattutto di una configurazione ad hoc dei singoli componenti in base al tipo di applicazione.

In questi casi, solitamente, si utilizzano le cosiddette unità *Line Array* (figura 22), costituite da schiere verticali di altoparlanti, seguendo, con le dovute proporzioni, il modello dei diffusori verticali presenti in ambienti come le chiese.

La direttività di ogni altoparlante varia in base alla frequenza, ad esempio, un altoparlante da 15" alle basse frequenze si comporta come omnidirezionale e la sua direttività aumenta in modo proporzionale con la frequenza. Posizionando gli altoparlanti uno sopra l'altro e pilotandoli con lo stesso segnale, si ottiene un particolare tipo di direttività: si creano

Nota 8 - Dolby Stereo.
Nota 9 - Dolby SR-D, DTS.

Fig. 22 - Esempio di Line Array.

Fig. 23 - Direttività dei *Line Array*.

infatti due tipi di zone, una in asse, dove si verifica un'interferenza costruttiva favorendo anche l'aumento di pressione sonora di 6 dB, e una fuori asse che provoca la cancellazione con la conseguente diminuzione della pressione sonora. L'interferenza distruttiva prende il nome di *combing*[Nota 10], in quanto le cancellazioni si verificano in modo regolare lungo l'asse delle frequenze.

La struttura *Line Array* fa in modo che le interferenze costruttive si verifichino dentro l'asse della schiera, mentre quelle distruttive siano rivolte verso i lati. E' da notare che in questo tipo di struttura, il *combing* non viene considerato come un elemento negativo, in quanto viene sfruttato per ottenere direttività di emissione sul piano verticale. Quindi si ottiene una diffusione maggiormente direttiva in verticale, mentre sul piano orizzontale l'apertura rimane la stessa di ciascun diffusore.

La forma del fronte d'onda si può quindi considerare come una porzione di cilindro. Questo, presenta il vantaggio di diffondere l'energia in maniera molto più direttiva (figura 23), su una superficie ridotta rispetto a un fronte d'onda sferico. Infatti, un'onda a porzione sferica risponde alla legge del quadrato inverso, secondo cui la pressione sonora diminuisce di 6 dB per ogni raddoppio della distanza percorsa. Invece, l'onda cilindrica perde soltanto 3 dB di pressione acustica fino a che rimane a una certa distanza dal punto di emissione detta campo vicino, o zona di Fresnel, oltre entra in campo lontano, o zona di Fraunhofer, all'interno del quale l'onda diventa sferica e inizia a perdere 6 dB per la legge citata in precedenza. Il passaggio tra le due zone dipende da due parametri: la lunghezza della schiera e la frequenza riprodotta. La relazione che consente di calcolare la distanza di transizione tra le due zone è:

$$d = \frac{3}{2} \cdot l^2 \cdot f \sqrt{1 - \frac{1}{3 \cdot l \cdot f}}$$

dove l è la lunghezza dell'array e f la frequenza.

Un altro parametro da considerare è la distanza tra gli altoparlanti affinché il *Line Array* funzioni. La distanza massima fra i centri acustici degli altoparlanti non dovrebbe superare la lunghezza d'onda della frequenza più alta che si vuole direzionare. Il risultato migliore si ottiene però considerando come distanza un quarto della lunghezza d'onda, ma spesso ci sono limiti di tipo costruttivo.

Nota 10 - da comb, pettine in inglese.

V-DOSC

Il sistema V-DOSC, di Christian Heil, ha rappresentato un notevole passo avanti per questo tipo di struttura, in quanto ha contribuito a risolvere il problema della riproduzione delle alte frequenze; creando un *line-array* valido per il *sound reinforcement*. Nella relazione presentata alla *Convention AES* nel 1992, venivano evidenziati i due princìpi su cui basava la *Wavefront Sculpture Technology* (WST), studiata sin dal 1988 da Heil insieme al Marcel Urban: un insieme di sorgenti sonore individuali disposte con passo regolare su una superficie continua, piana o curva, è equivalente a una singola sorgente sonora avente le stesse dimensioni del totale dell'insieme se si verifica almeno una delle seguenti condizioni:

- i fronti d'onda generati da sorgenti individuali sono planari e la superficie della sorgente sonora occupa almeno l'80% dell'intera superficie
- lo *step*, parola inglese corrispondente a passo, definito come la distanza fra i centri acustici delle sorgenti individuali, è più piccolo di metà della lunghezza d'onda di tutte le frequenze sopra la larghezza di banda a cui si opera

La parte più importante dell'impianto è proprio la guida d'onda in grado di creare un'onda cilindrica anche sulle alte frequenze, cosa impossibile da ottenere col semplice accoppiamento dei driver. La guida d'onda (figura 24) è formata da un condotto che separa-raccoglie le onde prodotte da un driver a compressione da 1,4" e, dopo un preciso percorso, le diffonde perfettamente in fase tramite una stretta fessura rettangolare, simulando in pratica il comportamento di un driver a nastro. Questa guida d'onda fa sì che la diffusione delle alte frequenze soddisfi la prima delle condizioni del WST.

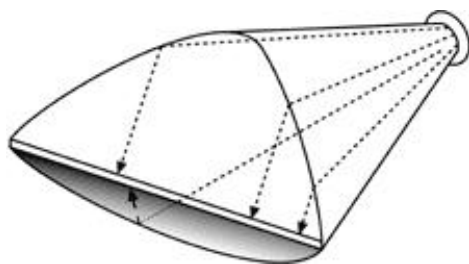



Fig. 24 - Guida d'onda.

Le frequenze basse e medio-alte vengono invece riprodotte con l'applicazione della seconda condizione, infatti, lo step fra i due altoparlanti 15" è di 75 cm. con un taglio di crossover a 200 Hz, mentre i centri dei due 7" distano 17 cm e sono tagliati a 1300 Hz; le frequenze dai 1300 Hz in su sono poi riprodotte dalla guida d'onda.

7.4 Ambienti altamente riverberanti

La realizzazione di sistemi di diffusione in ambienti molto riverberanti risulta spesso molto difficile. Questo a causa del fatto che in questo tipo di ambienti vanno considerati due elementi principali: la geometria delle strutture che li compongono e la tipologia di materiali, i quali incidono su un fattore fondamentale come l'intelligibilità. Basti pensare a luoghi come chiese e palestre, in cui spesso non viene effettuato un corretto trattamento acustico in fase di progettazione e il più delle volte l'intelligibilità del parlato è scarsa.

L'intelligibilità del segnale dipende dalla differenza in livello sonoro del segnale e il rumore di fondo ambientale a ciascuna frequenza dello spettro da 250 Hz e 4 kHz. Quando in una gamma di frequenze il livello sonoro viene sommerso dal rumore ambientale di fondo, per l'ascoltatore inizia la confusione! Per un ascolto corretto è necessario che il segnale arrivi in un tempo massimo di 50 ms, per cui il suono riflesso dalle superfici deve arrivare all'incirca con 30 ms di ritardo dal segnale diretto all'ascoltatore stesso (ritardi maggiori o uguali a 50 ms provocano una sensazione negativa di isolamento).

Esempio: le chiese

Le chiese rappresentano una caso tipico di ambiente altamente riverberante. Per la loro progettazione acustica quindi è necessario tener conto inizialmente delle caratteristiche di assorbimento dei materiali interni. I materiali più utilizzati sono principalmente marmi e intonaci, i quali presentano un coefficiente di assorbimento molto basso, favorendo quindi le riflessioni. Inoltre, è opportuno considerare anche la struttura e le dimensioni dell'ambiente, che molto spesso provoca lunghi percorsi delle onde sonore riflesse, le quali, giungendo all'ascoltatore con grande ritardo, possiedono ancora molta energia, provocando un notevole campo riverberato.

Il sistema di diffusione sonora gioca quindi un ruolo

fondamentale e quindi è opportuno scegliere in modo corretto i diffusori, poiché da essi dipende la modalità di formazione del campo sonoro. In base alla struttura dell'ambiente, gli altoparlanti più utilizzati sono i diffusori in linea (detti più comunemente diffusori a colonna - figura 25).

Fig. 25 - Esempio di diffusore verticale.

L'elevata direttività permette di massimizzare il rapporto tra suono diretto e riverberato, mentre la forma allungata verticalmente consente la collocazione lungo le colonne. Diffusori adatti a questi scopi sono i modelli digitali, che possono essere controllati da un mixer. Questi possiedono un certo numero di altoparlanti in linea (figura 26) pilotati internamente da un DSP (*Digital Signal Processor*) che permette di controllare il campo sonoro generato in modo da adattarlo alle caratteristiche acustiche dell'ambiente. Il controllo digitale di questi sistemi favorisce anche il controllo della direttività orientando l'emissione sonora senza dover inclinare il diffusore, garantendo una grande area di copertura. In questo modo è possibile sonorizzare grandi ambienti utilizzando un numero ridotto di diffusori collocati in posizione verticali e integrati con l'architettura. Grazie alla gestione digitale della direttività, l'energia sonora emessa dal diffusore viene concentrata sull'area di ascolto estendendo la profondità di copertura e riducendo il riverbero.

Tuttavia, per una corretta progettazione è necessario considerare anche il posizionamento e la scelta dei microfoni, che oltre ad essere poco sensibili, devono possedere alta direzionalità per ridurre l'accoppiamento con il campo riverberato. Tra le funzioni di elaborazione del segnale è anche necessario un dispositivo per la soppressione delle risonanze dovute all'accoppiamento tra diffusori e microfoni (*effetto Larsen*[Nota 11]).

In questo tipo di ambienti risulta fondamentale il calcolo del tempo di riverberazione T_{60}. Nel caso di una chiesa, il coefficiente di assorbimento medio dei materiali equivale solitamente a 0,05 per le frequenze comprese tra 125 Hz e 1 kHz, mentre per le frequenze superiori vale circa 0,1.

In base alle precedenti considerazioni, è opportuno limitare al minimo l'energia nella direzione del soffitto e delle pareti, concentrandola invece sul piano di ascolto. In questo modo, il rapporto tra campo diretto e campo riverberato risulta massimizzato, consentendo un ascolto chiaro anche in condizioni acustiche difficoltose.

Fig. 26 - Schema del diffusore.

Nota 11 - L'effetto Larsen è il tipico fischio stridente che si sviluppa quando i suoni emessi da un altoparlante ritornano ad essere captati con sufficiente "potenza di innesco" da un microfono e da questo rimandato al medesimo altoparlante, in un circuito chiuso. L'effetto si innesca solitamente quando il microfono è troppo vicino all'altoparlante e capta una frequenza emessa da quest'ultimo, in un dato momento più forte delle altre, che quindi viene amplificata e riprodotta a sua volta con ampiezza via via crescente, virtualmente illimitata, se non fosse che l'amplificatore va in overdrive.

Bibliografia

Su Acustica Architettonica

- *L. Scopece*: "L'audio per la televisione", Roma, Gremese, 2009.
- *A. Farina,* "Caratteristiche acustiche dei materiali".
- *Everest F. Alton:* "Manuale di acustica", Milano, Hoepli, 1996.
- *S. Cingolani, R. Spagnolo, Acustica musicale e architettonica, Milano, Città degli studi, 2007.*
- *R. Spagnolo*: "Manuale di acustica applicata", Milano, Città degli studi, 2008.
- *V. Lombardo, A. Valle*: "Audio e multimedia", Milano, Apogeo, 2005

Su altoparlanti

- *M. Masoero, R. Furlan*: "Appunti di teoria - Caratteristiche ad applicazioni degli altoparlanti", Politecnico di Torino, 2008
- *U. Nicolao*: "Teoria dei sistemi di altoparlanti per il Sound Reinforcement: dal Subwoofer al Cluster", Milano, Editrice il Rostro, 1999
- *U. Nicolao*: "La caratterizzazione degli altoparlanti dinamici" Milano, Editrice il Rostro, 2003.
- *M. Hull*: "Amplificatori e altoparlanti Hi-Fi", Bologna, Edizioni C.E.L.I., 1973.

"Elettronica e Telecomunicazioni", nata nel 1952 come "Elettronica e Televisione Italiana", è una rivista quadrimestrale di Rai Eri realizzata dal Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della Rai, sul cui sito è disponibile gratuitamente dal 2001.

Il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica (CRIT) della Rai nasce a Torino nel 1930 come "Laboratorio Ricerche" e dal 1960 ha sede in Corso Giambone 68. Successivamente assume la denominazione "Centro Ricerche" e, dall'ottobre 1999, quella attuale.
L'attività del Centro è coordinata dalla Direzione Strategie Tecnologiche.
Alla nascita, tra i suoi obiettivi ha la progettazione e realizzazione di impianti ed apparati di nuova concezione, non reperibili sul mercato. I profondi cambiamenti nello scenario delle telecomunicazioni hanno stimolato la trasformazione del Centro.
Ha ricevuto riconoscimenti a livello internazionale per i contribuiti forniti alle attività di studio e normalizzazione dei sistemi per la codifica dei segnali audio e video in forma digitale, allo sviluppo delle tecniche di compressione dei segnali attualmente alla base dei sistemi di trasmissione e registrazione dei segnali video, alla definizione degli standard di diffusione e trasmissione DVB.
Il Centro contribuisce all'evoluzione delle tecnologie relative al sistema radiotelevisivo e multimediale e supporta il Gruppo nelle scelte di indirizzo tecnologico e nella fase di sperimentazione e introduzione in esercizio di nuovi prodotti e sistemi. E' attivo in numerosi progetti finanziati in ambito europeo e nazionale e collabora con Università e Industrie per l'attività di ricerca, per la definizione dei nuovi standard e lo sviluppo dei nuovi servizi.

Rai Radiotelevisione S.p.A.
Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica
Corso E. Giambone, 68 - I 10135 Torino
www.crit.rai.it